

DOI: 10.7667/PSPC201702

基于连锁故障事故链搜索的输电网风险评估研究

孙启明¹, 石立宝¹, 司大军², 朱继忠³

(1. 清华大学深圳研究生院(电力系统国家重点实验室深圳研究室), 深圳 518055; 2. 云南电网有限责任公司
电网规划研究中心, 云南 昆明 650011; 3. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510080)

摘要: 针对传统风险评估所使用方法的局限性并考虑到电网实际需求, 提出了一种基于连锁故障事故链搜索的输电网风险评估方法。在事故链搜索模型方面, 提出了一系列改进措施, 计及了多种故障类型, 引入了暂态稳定、电压稳定、频率稳定以及系统解列等判据并匹配了实际系统的安稳措施。在风险评估模型方面, 结合电网历史数据提出故障相关性因子以增强事故链概率的合理性。此外, 还基于国务院 599 号令的打分方法提出并设计了风险指标, 并最终开发出了应用于实际电网的风险评估系统。通过对中国某省实际电网的仿真, 验证了所提方法的有效性和可靠性, 同时得到了一些有意义的结论。

关键词: 连锁故障; 事故链搜索; 风险评估; 安稳措施

Study on the risk assessment for transmission network based on failure chain search

SUN Qiming¹, SHI Libao¹, SI Dajun², ZHU Jizhong³

(1. National Key Laboratory of Power Systems in Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China;
2. Research Centre of Power Grid Planning, Yunnan Power Grid Company, Kunming 650011, China;
3. Electrical Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510800, China)

Abstract: Regarding the limitation of conventional solution pertinent to the risk assessment and the actual requirements of power grid, a risk assessment strategy based on failure chain search is proposed. For the modeling of failure chain search, some improvements including the consideration of multiple fault types, the introduction of transient stability, voltage stability, frequency stability and system splitting criteria with the match of emerging prevention and control measures are proposed. For modeling of risk assessment, a fault correlation factor combined with the historical data of power grid is proposed to enhance the feasibility of failure chain probability. Moreover, the corresponding risk indices based on the Decree No. 599 of the State Council are designed. The risk assessment system is designed and developed finally. Simulation results are performed on a real-sized power grid in China to verify the validity and reliability of the proposed method, and some meaningful conclusions are drawn.

This work is supported by National Key Basic Research Development Program (No. 2013CB228203).

Key words: cascading failure; failure chain search; risk assessment; system control measures

0 引言

近年来, 世界电网发生了一系列大停电事件, 由于互联等因素, 现代大停电事故呈范围广和损失巨大等特点^[1]。这些大停电事件的发生也给电网的风险评估工作提出了新的要求和挑战。

传统的电网风险评估方法一般采用蒙特卡罗法^[2-3], 但该方法忽略了电力系统各故障间的相关性因素。事实上, 研究表明大停电事故主要是由

连锁故障引起的^[4]。近年来也有不少学者对连锁故障所造成的系统风险进行相关研究^[5-11], 从不同的角度揭示了连锁故障对系统的影响, 但这些模型在建立风险评估模型时也以主观指标为主, 没有考虑到国家有关规定所建立的标准。另外, 考虑到风险评估的实际需求, 连锁故障模型一般采取事故链搜索方法^[12-16], 但已有的事故链搜索方法一般仅考虑稳态过程以及线路故障, 缺乏对系统暂态过程的考量, 而且较少考虑实际系统连锁故障发生时的一些重要因素(例如安稳措施等), 使用的方案也大多与实际系统有一定差距。此外, 已有的方法在计算

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB228203)

事故链概率时较少使用电网历史故障数据，并且很少在概率因素中考虑到故障间的相关性。

本文考虑到电网的实际需求，基于连锁故障事故链搜索方法提出了电网风险评估策略。事故链依据 BPA 暂态和稳态结果生成，在搜索过程中考虑到电网实际使用了包括线路故障和变压器故障在内的多种故障类型；此外还应用了包括暂态稳定、电压稳定、频率稳定以及系统解列等判据进行稳定性判断并匹配了实际系统的安稳措施。电网风险评估则结合历史数据提出了故障相关性因子对事故链概率进行计算，并基于国务院 599 号令的打分方法对事

故后果进行评价以建立风险评估模型。最后，开发出了电网风险评估系统并对中国某省电网实际算例进行了验证，对典型故障进行了分析。

1 事故链搜索模型

本文采用事故链搜索的形式来反映连锁故障，单条事故链的搜索流程包括初始化和初始故障设定、系统状态判断与安稳措施、后续故障搜索以及结果记录共 4 部分，流程示意如图 1 所示。其中，潮流计算和系统稳定判断基于电力系统分析软件 BPA 来实现。

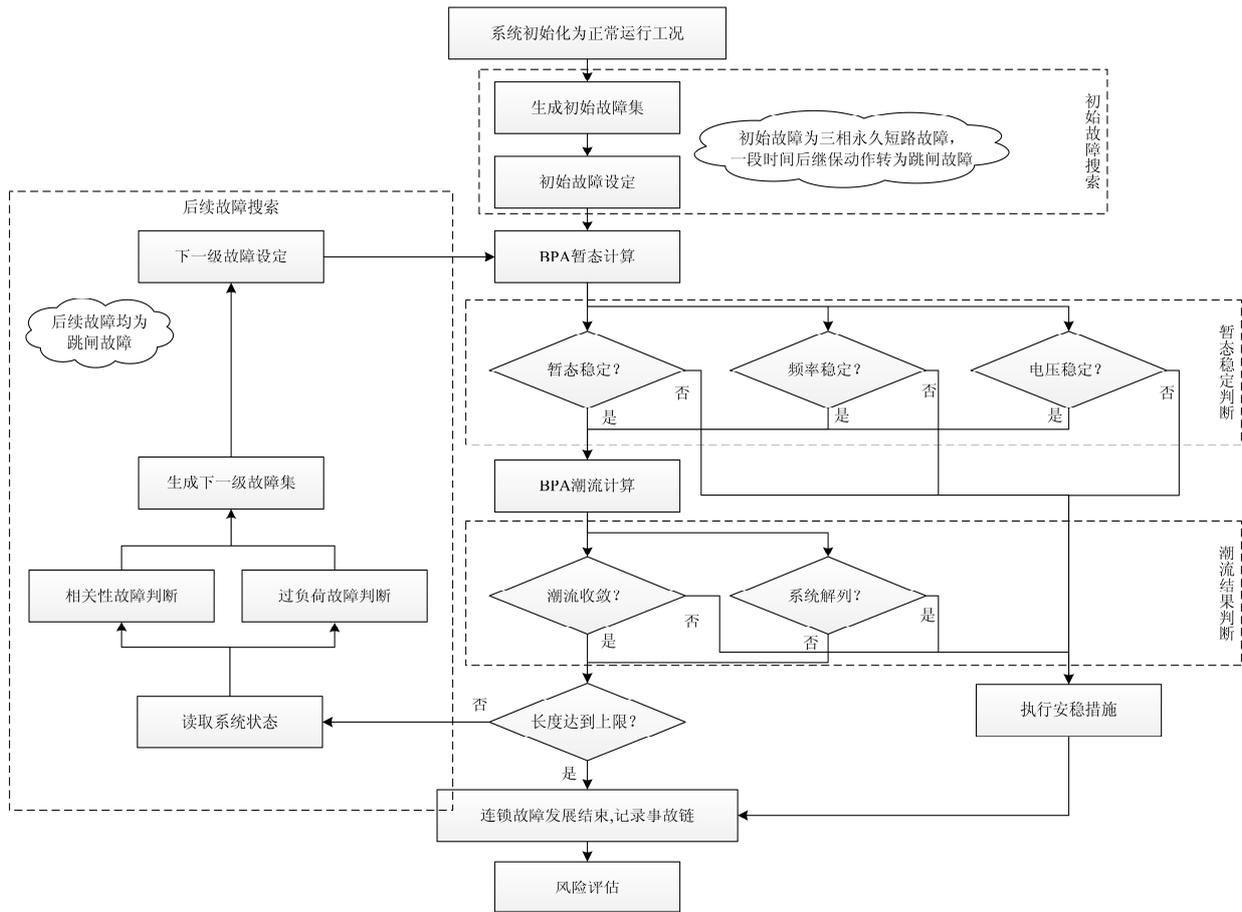


图 1 事故链搜索流程

Fig. 1 Failure chain search procedure

下面对本模型的各部分进行具体说明。

1) 系统初始化: 读取 BPA 潮流数据文件确定系统初始运行状态(正常运行工况)，连锁故障由初始运行状态开始发展。

2) 初始故障设定: 将考察区域符合设定电压等级要求的线路和变压器设为初始故障集，从该集合中依次取出元件设为初始故障，并分别就稳态和暂态过程进行仿真。其中稳态过程故障均为跳闸故障，

暂态过程故障为线路三相永久短路接地故障，既定时间内保护动作切除故障。

3) 系统状态判断: 本模型中分别进行 BPA 暂态和潮流计算，利用得到的结果对系统状态判断。

对暂态结果的判断包括暂态稳定、电压稳定和频率稳定，参考《南方电网安全稳定计算分析导则》^[17]，判据分别为

暂态稳定：采用暂态稳定指标 TSI 来衡量。

$$TSI = \frac{360 - \delta_{\max}}{360 + \delta_{\max}} \times 100 \quad (1)$$

其中, δ_{\max} 为同一时间内交流系统内任意两发电机之间的最大功角差。该指标为正值时, 系统稳定, 为负值时, 系统失稳。

电压稳定: 分为短期稳定和长期稳定两种。短期稳定判据为系统暂态过程中主网(指 220 kV 以上电压等级, 下同)母线电压持续低于 0.75 p.u. 的时间, 若超过 50 周波则认为失去稳定; 长期稳定判据为系统最终(暂态仿真结果最后 0.5 s 的平均值, 下同)主网母线电压值应在 0.5~1.45 p.u., 否则认为失去稳定。

频率稳定: 同样分为短期稳定和长期稳定。短期稳定为暂态过程中频率应在 48~53 Hz, 长期稳定为系统最终频率值应在 49~51 Hz, 超出范围则认为系统频率失稳。

通过对 BPA 潮流结果的读取则可得到系统的潮流收敛性和解列情况的结果(若系统出现解列, BPA 会进行相应提示)。

如果以上任一结果不正常, 则采用系统安稳措施, 并且不再搜索后续故障。

4) 系统安稳措施: 为了保证结果的可靠性, 本模型直接匹配系统中已整定并采用的实际切机切负荷策略。

5) 后续故障搜索: 分为过负荷故障和相关性故障两种。对于过负荷故障的判定, 直接将元件当前电流(或功率)与额定值进行比较, 若大于额定值, 则认为其可能发生有过负荷故障, 加入故障集中。

相关性故障是指由于本级故障导致系统状态的变化对其他元件造成影响, 并诱发其发生的故障。一般包括继电保护装置误动、本级故障引发的短路电流和动态稳定因素等引发的隐故障。目前常用的确定方式为潮流转移。

潮流转移的基础值为潮流转移量, 即本级故障发生前后元件有功潮流的差值:

$$\Delta P = |P - P_{\text{pre}}| \quad (2)$$

传统意义上, 潮流转移一般是对潮流转移量与本级故障发生前故障元件功率或考察元件功率求取比值, 该方式并不能完全反映潮流转移对故障的影响。由此, 本文提出, 通过相关性和可能性两个维度来进行考察, 定义为

$$T_r = \Delta P / P_{\text{fail}} \quad (3)$$

$$T_p = \Delta P / P_0 \quad (4)$$

式中: 相关性比值 T_r 为潮流转移量与故障元件功率 P_{fail} 的比值, 其反映的是考察元件受到本级故障影

响的程度; 可能性比值 T_p 为潮流转移量与该元件额定功率 P_0 的比值, 其反映的是潮流转移对考察元件的影响程度。只有两者都超过设定阈值才被认为考察元件有可能发生相关性故障, 并将其加入到故障集中。

另外, 考虑到不同电压等级中运行方式可能有所不同, 因此对不同电压等级潮流转移的相关性比值的阈值相对同电压等级的要小一些。

最后, 对故障集中的所有元件, 去重后依次选择作为下一级故障, 并进行稳态和暂态过程仿真, 后续故障的稳态和暂态过程均为跳闸故障, 其中各级故障在暂态过程中会有短暂的时间间隔(一般为 5 周波), 如果故障集中没有故障或者搜索层数已达到设定上限, 则本次搜索结束。

6) 结束处理: 连锁故障搜索结束后, 记录连锁故障的有关信息, 包括事故链的各线路、概率、负荷损失及仿真得到的其他信息(如潮流不收敛、系统解列等)。

2 风险评估模型

本文通过连锁故障事故链对整个系统的风险状况进行评估, 因此需要通过事故链的风险评估来得到整个系统的风险, 鉴于“风险=后果×概率”, 本章将通过后果和概率这两方面进行分析得到连锁故障的风险评估模型, 进而得到整个系统的风险评估模型。

2.1 连锁故障概率模型

实际电网的数据中并没有给出具体的故障概率数值, 但有通过历史数据得到的元件故障率和修复率, 通过这两者即可得到对应的故障概率。其中, 元件故障概率与其故障率和故障修复率的关系为

$$p_c = \frac{k_c \cdot t_c}{8760} \quad (5)$$

$$l_c = 8760 / t_c \quad (6)$$

式中: p_c 为元件 c 的故障概率; k_c 和 l_c 为该元件给定的故障率(次/年)和故障修复率(次/年); t_c 为故障的持续时间。

由式(5)、式(6), 可得

$$p_c = k_c / l_c \quad (7)$$

即元件的故障概率等于其故障率与修复率的比值。可以看出该方式的使用基础均为实际历史数据, 结果较为可靠。

而对于整个事故链的概率, 传统模型一般采取下式进行求解。

$$p = p_0 \prod_{i=2}^n p_i \quad (8)$$

式中： p_0 为初始故障元件对应的故障率(第 1 级故障)； n 为事故链长度，即连锁故障搜索深度； p_i 为第 i 级故障的故障率。

该式中各层故障间为直接相乘的关系，意味着公式中认为它们是相互独立的。而实际上，连锁故障中各层间存在一定的相关性。为了体现这种相关性，本文引入了“相关性因子”来求解概率。

$$p = p_0 \prod_{i=2}^n p_f p_i \quad (9)$$

式中， p_f 即为故障相关性因子，其数值为大于 1 的数，该值越大，说明故障层直接的相关关系越大。

考虑到文中连锁故障是通过元件过载和潮流转移确定的，因此所提出相关因子的计算公式为

$$p_f = p_{f_0} (f_o + f_t) \quad (10)$$

式中： p_{f_0} 为相关性因子基值(本文中取 10)； f_o 和 f_t 分别为过载因子和潮流转移因子，定义为

$$f_o = \begin{cases} 1 & L_o \leq 1 \\ L_o & L_o > 1 \end{cases} \quad (11)$$

$$f_t = \begin{cases} \frac{T_r}{T_{r0}} + \frac{T_p}{T_{p0}} & T_r \geq T_{r0}, T_p \geq T_{p0} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

式中： L_o 为元件过载比(元件实际功率与额定功率的比值)； T_{r0} 和 T_{p0} 为对应相关性比值的阈值。

2.2 连锁故障后果评价

目前，现有大多数风险评估方法的后果评价均使用负荷损失来进行，此时得到的结果实际为负荷损失期望

$$E_{\text{loss}} = L \cdot p \quad (13)$$

式中， L 为事故链的负荷损失。该方法具有判据方便和物理意义清晰等优点，因此本文采用其进行后果评价。使用负荷损失对后果进行评价也有一些问题，例如需要考虑电网规模，结果不能反映监管部门的要求等。事实上，《电力安全事故应急处置和调查处理条例》^[18](国务院第 599 号令，简称 599 号令)将电网事故后果分为特别重大事故、重大事故、较大事故和一般事故 4 级，不同事故等级对应的后果和处理方式也有所不同。

本文将 599 号令中的有关规定作为事故后果分级标准。为了对分级结果进行量化，本文使用打分的方式得到结果，每条事故链都基于其后果对应事故链风险分值(FCRP)。考虑到不同等级事故对应的处置措施、社会影响和相应的监管措施有着很大的不同，因此打分中事故等级的因素占主要部分。另外，同一事故等级内，不同负荷损失所造成的影响

略有不同，也应该在打分中加以考虑。综上，本文中打分遵照“不同等级事故后果应有较大差距，同等级事故后果有适当差距”这一原则进行，在满分 100 分的基准下，将分值分为事故等级基础分值和负荷损失附加分值两部分，即

$$FCRP = FCRP_b + FCRP_1 \quad (14)$$

式中， $FCRP_b$ 、 $FCRP_1$ 分别为事故链风险分值的事故等级基础分值和负荷损失附加分值部分。

事故等级基础分值 $FCRP_b$ 仅与相应事故链对应的事故等级有关，本文中采用表 1 的设定来进行评价。

表 1 事故等级基础分值对照表

Table 1 Table of basic point for failure level

事故等级	事故等级基础分值
特别重大事故	100
重大事故	60
较大事故	30
一般事故	10
其他	0

注：“其他”指达不到事故等级的事故

负荷损失附加分值 $FCRP_1$ 为事故相对对应等级基准值额外附加的分值，按照前文所述的原则，本文额外附加分值最多为 5 分，采用线性模型给出，公式为(其中特别重大事故无附加分)

$$FCRP_1 = \frac{L - L_0}{L_1 - L_0} \cdot 5 \quad (15)$$

式中： L 为式(13)中事故链的负荷损失； L_0 为该等级对应的最低负荷损失； L_1 为上一个等级对应的最低负荷损失。

由此，可将事故等级与分值的关系总结成图 2。可以看出，打分值实际上是一个关于事故等级和负荷损失的分段函数，合理地反映了等级之间的差距和等级内部的差距，在事故等级分界线附近的跳变反映的就是不同事故等级间巨大的后果差异。

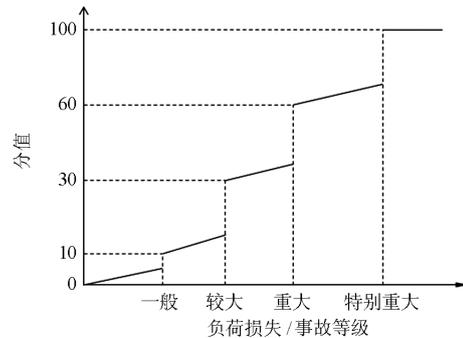


图 2 事故等级与分值的关系

Fig. 2 Relationship between failure level and point

这里需要说明的是, 由于事故等级与考察区域密切相关, 同一事故链在不同的区域得到的分值是不同的, 这也体现出了风险的区域性。另外, 如果事故链发生了暂态失稳, 经安稳措施后仍未解决, 则认为全网区域发生特别重大事故, 各分区发生相应最高等级的事故, 得分为相应的基础分值, 无负荷附加分值。

因此, 单个连锁故障风险 F_L 值为其对应的分值与概率值的乘积, 考察区域的风险值 F_A 为该区域内存在风险事故链风险值的和, 如式(16)、式(17)所示。

$$F_L = FCRP \cdot p \quad (16)$$

$$F_A = \sum_{L \in A} F_L \quad (17)$$

2.3 电网风险评估系统的开发

为了方便和快速地对电网进行风险评估, 本文基于前述事故链搜索模型和风险评估模型, 开发了基于事故链搜索的电网风险评估系统, 系统主界面如图 3 所示, 系统整体逻辑体系结构如图 4 所示。



图 3 风险评估系统界面

Fig. 3 GUI of risk assessment system

系统的主要功能如下。

- 1) 人机交互界面(GUI): 主要执行工程设置、参数设置、文件管理及结果输出显示等功能。
- 2) BPA 计算模块: 根据事故链的发展情况, 生成 BPA 的有关文件, 调用 BPA 对系统进行潮流计算和暂态稳定计算, 并读取有关结果。
- 3) 事故链搜索模块: 基于参数设置和 BPA 结果, 依照给定的模型对连锁故障进行搜索, 得到事故链并保存有关信息。
- 4) 风险评估模块: 依据事故链搜索结果对系统及制定域进行风险评估。
- 5) 结果输出模块: 将事故链和风险评估有关结果生成 Excel 报表, 供有关人员使用和分析, 生成的 Excel 报表如图 5 所示(图中为事故链结果)。
- 6) 各模块交互: 各模块间通过参数调用及文件交换等方式实现交互。

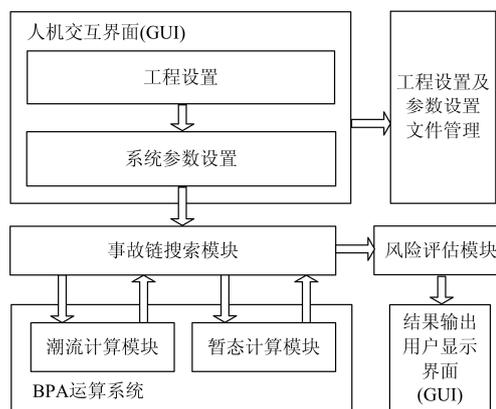


图 4 风险评估系统逻辑结构

Fig. 4 Logical architecture of risk assessment system

序号	线路1	概率1	线路2	概率2	线路3	概率3	负荷损失总值	各分区负荷损失	风险值	风险等级	备注
1	8991	0.003258	8992	0.003258	8990	0.000173	0	N/A	1.84E-05	全网暂态失稳	暂态失稳
2	8308	0.00116	8306	0.00116	8307	0.00116	0	N/A	1.56E-05	全网暂态失稳	暂态失稳
3	8306	0.00116	8307	0.00116	8304	0.000695	0	N/A	9.34E-06	全网暂态失稳	暂态失稳

图 5 风险评估系统结果输出示意图

Fig. 5 Example output of risk assessment system

3 算例分析

为了对本文所提模型和设计的电网风险评估系统进行验证, 本文选取某省电网夏季运行方式进行测试。此处分别考察了主网 500 kV 网架和部分典型地级市区域的 500 kV 和 220 kV 网架。仿真时设定事故链搜索层数为 3 层, 潮流转移相关性和可能性比值的阈值分别为 20%(不同电压等级 5%)和 25%。

3.1 总体结果

对考察区域分别进行仿真, 结果如表 2 所示。

表 2 各区域仿真总体结果

Table 2 Overall results of simulation in each area

仿真区域	事故链数量	暂态失稳数量	一般事故链数量
全网 500 kV	1671	59	12
省会城市 A	1675	0	400
地级市 B	1842	0	269
地级市 C	555	6	20

注: 一般事故链指有潜在风险(发生负荷损失)的其他事故链

从表 2 可以看出, 主网更容易发生较为严重的事故, 但由于网架足够坚强, 普通的事故较少。而各区域电网由于 220 kV 线路辐射拓扑较易发生解列导致失负荷, 不过对主网的冲击不大, 因此严重事故很少。

3.2 事故链结果

本节主要对仿真过程中部分具有代表性的事故链进行说明。由于事故链的发生是具有时间顺序的, 所以不同的事故链有可能最终发生故障的线路是一

致的，为方便研究，本文仅将事故链结果总结成各种形式，忽略了其中的顺序。

首先是 500 kV 主网的分析，先是对暂态失稳事故链的分析，其主要包括多回线路、双回线+单线、临近线路以及变压器故障这几种形式，主要集中在 3 个区域，限于篇幅，这里仅给出了其中两个区域的结果，如图 6 所示。

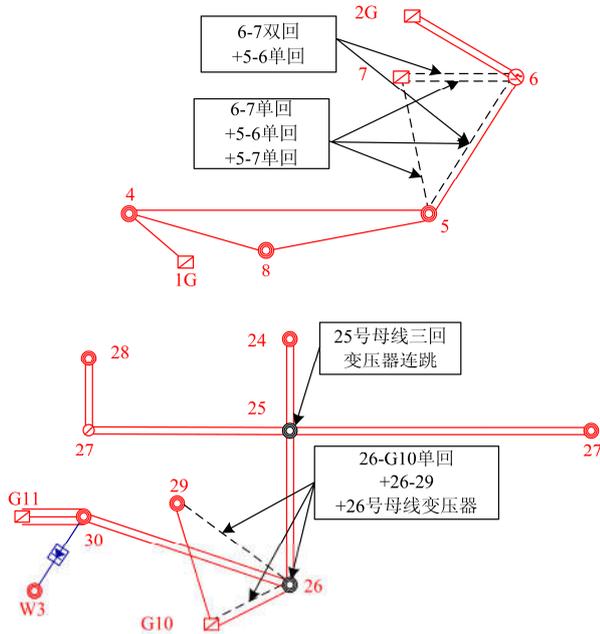


图 6 暂态失稳事故链示意图(1)、(2)

Fig. 6 Schematic diagram (1), (2) of transient instable failure chains

可以看到，这些事故链里面故障元件之间都具有明显的相关性，这与仿真设定和实际大停电的情况相一致。而对这些事故链的概率和风险进行分析可以发现，线路类故障相对来说风险高一些，例如 6-7 双回和 5-6 单回组成的事故链概率为 1.8×10^{-7} ，风险值为 0.000 018，而带有变压器事故链由于变压器的故障概率较低，因此相对风险值会小很多。

对于解列事故，主网 500 kV 事故链中的解列事故均是变压器连锁故障引发的解列，这主要是由于现在 500 kV 与 220 kV 线路解环运行，以经过变电站几回并联变压器进行电气连接为主。因此变压器连锁故障会使 500 kV 主网与此区域 220 kV 及以下的子网解列，例如其中损失最大的一个为 15 号母线两回变压器连跳，负荷损失达 1089.9 MW，期望为 1.72×10^{-5} MW，风险值为 2.18×10^{-7} 。可见变压器类连锁故障对系统存在一定冲击，应予以重视。

而对于各分支区域的情况，由于 220 kV 线路大多开环运行，因此造成负荷损失的解列事故较多，

但真正能对全网造成冲击的事故很少。如图 7 所示，152-153 双回故障会导致 153、154 两个 220 kV 节点与主网解环，从而造成负荷损失。该事故链的负荷损失为 341.7 MW，期望为 0.0715 MW，风险值为 0.000 461。

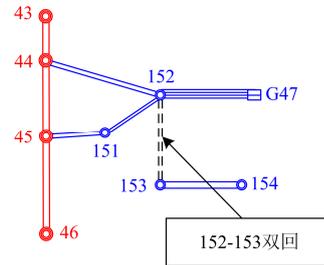


图 7 解列事故链示意图

Fig. 7 Schematic diagram of splitting failure chains

如果对这一事故链进行暂态仿真分析会发现，BPA 提示暂态失稳，而事实上，暂态失稳的原因是由于解列区域的“小机大网”所导致，功角差最大的两台发电机也均在本区域。

鉴于这种情况，本系统会对暂态失稳情况再作一次校核，对问题发生在解列区域的，认为该区域失去全部负荷。这种考虑的完备性也使结果更加可靠。另外，由于系统的风险值与概率有很大关系，所以一些较短的事故链(如上面的例子)相对来说概率较大，对这类两层甚至一层(该系统有极少数 220 kV 节点通过单线与外界连接，断开该线即会解列)事故链应格外注意并对有关线路提出更高的安稳措施要求。

3.3 风险评估结果

对各区域分别进行风险评估，结果如表 3 所示。

表 3 各区域风险评估结果

Table 3 Risk assessment results for each area

仿真区域	区域负荷 总量/MW	考察区域风险值	负荷损失期望/MW
全网 500 kV	21 412.6	0.000 55	0.035
省会城市 A	5385.9	0.0023	0.25
地级市 B	3878.6	0.0021	0.32
地级市 C	347.8	0.0037	0.013

注：全网暂态失稳事故链视为负荷损失 30%

从表 3 可以看出，两种评估方法都显示整个系统的风险值很小，整体可控。这里有一点需要说明，就是有关区域的故障也可能对其他区域造成影响，出现风险值，例如 A 区域的事故链集合对 B 区域的风险值为 0.000 37，这也反映出本文所提方法的一个优势：可以根据各自区域情况分别独立进行评估。

3.4 安稳措施评估

在事故链搜索流程中曾经提到, 在系统暂态失稳时将会采取安稳措施。事实上, 在本次仿真过程中, 共有 60 种情况(注: 相同线路组成的事故链可能不同, 但安稳措施一致, 此处进行归类处理)触发了安稳措施, 其中有 1 次失败, 其余 59 次均成功。

图 8 是本次仿真中唯一一种安稳采取后仍暂态失稳的事故链, 也是分区搜索中唯一一种暂态失稳的事故链。该事故链的概率为 2.07×10^{-5} , 风险值为 6.21×10^{-4} 。

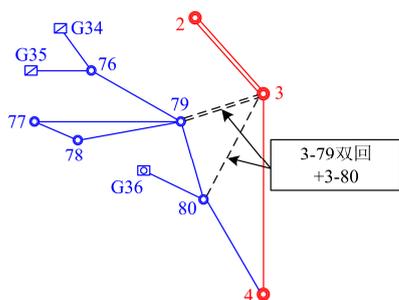


图 8 暂态失稳事故链示意图(3)

Fig. 8 Schematic diagram (3) of transient instable failure chains

由于普通的安稳措施一般是通过 $N-1$ 、 $N-2$ 校核得到的, 该事故链触发了 3-79 双回 $N-2$ 的安稳措施, 共切机 167.70 MW, 采取安稳措施前后的功角曲线如图 9 所示。

可以看出, 由于事故情况比安稳措施针对的 $N-2$ 要更加复杂, 因此出现了欠切的情况, 系统不能暂态稳定, 此处建议在设计安稳措施时应考虑到潜在的连锁故障风险及对策。不过, 绝大多数安稳措施起到了其应有的作用, 剩余 59 种故障的潜在风险均被安稳措施化解。这也说明有效的安稳措施对防治事故链的发生及其影响有着很大的作用。

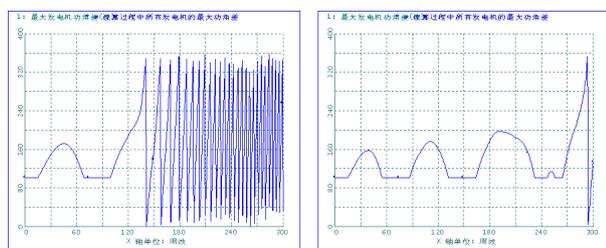


图 9 采取安稳措施前后的功角曲线

Fig. 9 Power angle curve before and after stability measures

4 结论

本文基于连锁故障事故链搜索方法提出了一种实际的电网风险评估模型。事故链搜索过程中考虑了故障的多种形式和故障相关性, 并考虑了安稳措

施的作用; 风险评估模型中提出了基于历史数据的元件概率模型, 在 599 号令的基础上, 通过打分的方式对事故链进行了科学合理的评价。最后基于所提模型和 BPA 软件开发出了电网风险评估系统, 可用于对实际电网的风险评估。

通过对某省电网夏季运行方式的仿真, 发现该地区 500 kV 主网网架较为合理, 暂态失稳和解列风险较小。而各区域潜在风险事故形式以解列为主, 同时部分较短的事故链风险偏大, 应采取相关措施。最后, 对安稳措施的研究表明, 合理的安稳措施对控制事故链对系统的冲击有着很大的作用。仿真同时验证了所提方法和系统的有效性和可靠性。

参考文献

- [1] 辛阔, 吴小辰, 和识之. 南网电网大停电回顾及其警示与对策探讨[J]. 南方电网技术, 2013, 7(1): 32-38.
XIN Kuo, WU Xiaochen, HE Shizhi. Review on the blackout of power systems and discussion on its security lessons and related countermeasures[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(1): 32-38.
- [2] 李文沅. 电力系统风险评估模型、方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [3] 杨高峰, 康重庆, LI Furong, 等. 电网规划方案的适应性与风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(23): 1-8.
YANG Gaofeng, KANG Chongqing, LI Furong, et al. Flexibility and risk assessment of power grid planning schemes[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(23): 1-8.
- [4] 石立宝, 史中英, 姚良忠, 等. 现代电力系统连锁性大停电事故机理研究综述[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 48-54.
SHI Libao, SHI Zhongying, YAO Liangzhong, et al. A review of mechanism of large cascading failure blackouts of modern power system[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 48-54.
- [5] QI Hanbo, SHI Libao, SUN Qiming, et al. Risk assessment of cascading failures based on entropy weight method[C] // Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 2016: IEEE, 2016: 1-5.
- [6] LIU Xuan, LI Zuyi. Revealing the impact of multiple solutions in DCOPF on the risk assessment of line cascading failure in OPA model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 4159-4160.
- [7] 薛士敏, 孙文鹏, 高峰, 等. 基于精确隐性故障模型的输电系统连锁故障风险评估[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1012-1017.
XUE Shimin, SUN Wenpeng, GAO Feng, et al. Risk

- assessment of transmission system cascading failure based on accurate hidden failure model[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1012-1017.
- [8] 丁明, 肖遥, 张晶晶, 等. 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.
DING Ming, XIAO Yao, ZHANG Jingjing, et al. Risk assessment model of power grid cascading failures based on fault chain and dynamic fault tree[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 821-829.
- [9] 邹欣, 程林, 孙元章. 基于线路运行可靠性模型的电力系统连锁故障概率评估[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(13): 7-11.
ZOU Xin, CHENG Lin, SUN Yuanzhang. Cascading failure probabilistic assessment of power systems based on operational reliability model for transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(13): 7-11.
- [10] 胡文平, 于腾凯, 巫伟男. 一种基于云预测模型的电网综合风险评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 35-42.
HU Wenping, YU Teng kai, WU Weinan. A comprehensive power grid risk assessment method based on cloud prediction model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 35-42.
- [11] 金波, 肖先勇, 陈晶, 等. 考虑保护失效和电网动态平衡特性的连锁故障风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 1-7.
JIN Bo, XIAO Xianyong, CHEN Jing, et al. A method of risk assessment considering protection failures and dynamic equilibrium of power grid[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 1-7.
- [12] NEDIC D P, DOBSON I, KIRSCHEN D S, et al. Criticality in a cascading failure blackout model[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2006, 28(9): 627-633.
- [13] WANG Ansi, LUO Yi, TU Guanyu, et al. Vulnerability assessment scheme for power system transmission networks based on the fault chain theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 442-450.
- [14] SUN Qiming, SHI Libao, YAO Liangzhong, et al. A practical simulation model for event chains search in power system cascading failure[C] // Power System Technology (POWERCON), 2014 International Conference on: IEEE, 2014: 813-819.
- [15] SONG Jiajia, COTILLA-SANCHEZ E, GHANAVATI G, et al. Dynamic modeling of cascading failure in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 2085-2095.
- [16] 张晶晶, 王政余, 丁明, 等. 并联储能型 FACTS 元件对连锁故障的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 90-96.
ZHANG Jingjing, WANG Zhengyu, DING Ming, et al. Influences of FACTS element with energy storage on cascading failures[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 90-96.
- [17] 南方电网安全稳定计算分析导则: Q/CSG 11004—2009[S].
- [18] 国务院. 电力安全事故应急处置和调查处理条例[S]. 北京: 中国法制出版社, 2011.

收稿日期: 2017-04-07; 修回日期: 2017-09-05

作者简介:

孙启明(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统连锁故障及风险评估研究; E-mail: sunqm10@qq.com

石立宝(1971—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为多能系统并网运行与控制及互补协同调度技术研究, 电力系统连锁故障及恢复控制, 电力系统动态安全评估; E-mail: shilb@sz.tsinghua.edu.cn

司大军(1976—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制。

(编辑 葛艳娜)