

$N-2$ 组合故障集的暂态功角稳定在线快速评估

徐泰山, 鲍颜红, 杨莹, 周海锋, 徐伟, 薛禹胜

(国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司, 江苏 南京 211106)

摘要: 大电网中 $N-2$ 组合故障数目巨大, 若对每个组合故障分别进行暂态功角稳定评估, 难以满足在线评估的时间要求。基于 $N-2$ 组合故障中第一个元件故障的暂态功角稳定在线评估结果(裕度和主导群发电机的参与因子), 结合第一个元件故障的暂态功角稳定主导群中发电机的有功功率对第二个开断元件有功功率的灵敏度, 计算出 $N-2$ 组合故障的暂态功角稳定严重程度排序指标。通过优先对排序在前位的组合故障进行基于详细模型时域仿真的暂态功角稳定量化评估, 直至排序号连续的多个组合故障的暂态功角稳定裕度都大于0, 则直接判定排序在其后的所有组合故障均是暂态功角稳定的, 从而满足 $N-2$ 组合故障集暂态功角稳定在线评估对计算速度的要求。实际电网算例验证了该方法的有效性。

关键词: 暂态功角稳定; 组合故障; 故障筛选; 参与因子; 有功灵敏度

Online fast transient angle stability assessment of $N-2$ contingency set

XU Taishan, BAO Yanhong, YANG Ying, ZHOU Haifeng, XU Wei, XUE Yusheng

(State Grid Electric Power Research Institute/NARI Group Corporation, Nanjing 211106, China)

Abstract: The total number of $N-2$ faulty element combinations is huge in large scale power system. Transient angle stability analysis for all $N-2$ contingencies cannot be finished in given time required by online assessment. The index for contingency severity ranking is proposed to filter out slight cases. The index is calculated based on the stability margins and dynamic modes of the $N-1$ contingency and sensitivity analysis of another faulty element to generators in the critical cluster. Contingencies with larger index are selected for detailed transient angle stability assessment in order. If the transient angle stability margins of multiple sequential contingencies are greater than 0, subsequent contingencies can be judged stable. Real engineering applications in actual power grid have fully confirmed the validity and practicability of this method.

Key words: transient angle stability; faulty element combination; contingency screening; participation factor; active power sensitivity

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)07-0122-05

0 引言

随着负荷密度的不断增大, 电网结构越来越紧密, 同时远距离大规模电力输送需求的持续增多, 电网的规模也在不断扩大, 电网中发生 $N-2$ 组合故障的概率随之增大。近年来国际上多起大停电事故统计调查与分析报告表明, 多重故障、连锁故障和相继故障是引发大停电事故的重要原因^[1-7]。由于电

力系统中元件众多, 任意组合的 $N-2$ 组合故障数目很大, 若对每个 $N-2$ 组合故障都进行详细的暂态功角稳定分析, 计算量巨大, 为此, 需要从任意组合的 $N-2$ 故障集中先筛选出暂态功角稳定性相对严重的故障, 再对筛选出的故障集进行详细的暂态功角稳定分析与控制决策计算。

目前, 工程上较为普遍的筛选方法为电网计算分析人员凭经验设定少量的 $N-2$ 组合故障, 其可靠性受到电网计算分析人员经验的约束。而理论研究成果中暂态功角稳定预想故障筛选算法主要有两类: 基于暂态能量函数的方法^[8-9]和基于人工智能的方法^[10-15]。基于暂态能量函数的预想故障筛选方法

基金项目: 国家电网公司资助项目“大电网规划与运行控制技术深化研究重大专项(SGCC-MPLG003-2012)”及“输电线路在线动态增容技术研究与应用”

不需要事先进行大量的离线计算, 直接对预想故障进行筛选, 筛选速度很快。基于人工智能的预想故障筛选方法包括两类, 一类是通过事先设置特征量, 例如故障前、故障时刻和故障清除时刻的电力系统运行状态等信息, 建立训练样本集, 进行大量的离线计算, 构建暂态功角稳定分类器, 再针对需要评估的电力系统运行方式, 分别对每个预想故障基于详细模型进行自故障发生时刻起到故障清除时刻结束的时域仿真, 计算相应的特征量, 通过人工神经网络^[10-11]方法实现对预想故障的筛选。另一类也是事先设置特征量, 除故障前、故障时刻和故障清除时刻的运行状态等信息之外, 还增加了故障清除后一小段时间的运行状态信息^[12-14], 例如文献[12]将基于暂态能量函数计算出的系统能量裕度等信息也作为特征量, 但不需要大量的离线计算构建训练样本集, 直接针对需要评估的电力系统运行方式, 分别对每个预想故障基于详细模型进行自故障发生时刻起到故障清除后一小段时间结束的时域仿真, 计算相应的特征量, 采用模糊子集^[13,15]、综合性能指标^[14]和聚类分析^[12]等方法进行预想故障的筛选。

由于电力系统是非自治非线性运动系统, 无法不通过基于详细模型的时域仿真来确保对于暂态功角稳定与否的正确判断, 因此, 无论是基于暂态能量函数的方法, 还是基于人工智能的方法, 都难以协调好筛选效率和筛选正确性的矛盾, 无法避免“误判”情况的发生。

互补群群际能量壁垒准则(CCEBC)是普适于非自治非线性运动系统稳定性分析的量化方法, 已经在国内外电力系统的稳定分析与控制工程中得到了广泛应用^[16]。文献[17]基于CCEBC给出暂态功角稳定主导模式中发电机分群信息, 根据每台发电机的加速动能或减速动能之间的比例关系来识别各台发电机的暂态功角稳定参与因子。文献[18]依据上一时间断面各预想故障的暂态功角稳定裕度和发电机的暂态功角稳定参与因子, 先识别影响系统稳定性的关键元件, 再根据关键元件运行状态的变化, 实现了暂态功角稳定在线预警的预想故障自适应筛选。

实际电网中可能发生 $N-1$ 故障后潮流转移引起元件过负荷跳闸以及保护误动造成其他元件无故障跳闸; 保护/开关拒动情况下失灵保护动作, 造成故障相邻元件的无故障跳闸。因此本文所述 $N-2$ 组合故障是指电力系统中一个元件发生故障, 另一个支路(线路或变压器)无故障跳闸。 $N-2$ 组合故障中第二个支路元件无故障跳闸会导致第一个元件故障所引起的发电机加速功率发生变化, 其综合影响程度

与第一个元件故障的暂态功角稳定裕度^[7]、主导群中发电机的参与因子^[9]及其有功功率对第二个支路元件有功功率的灵敏度三者紧密相关。本文基于此提出了 $N-2$ 组合故障的暂态功角稳定严重程度排序指标的计算方法, 再优先对排序在前位的故障进行基于详细模型时域仿真的暂态功角稳定量化评估, 直至排序号连续的多个 $N-2$ 组合故障的暂态功角稳定裕度都大于0, 则直接判定排序在其后的所有 $N-2$ 组合故障均能保持暂态功角稳定, 由此实现对 $N-2$ 组合故障集的暂态功角稳定在线快速评估。

1 理论和方法基础

CCEBC建立了“互补群惯量中心相对运动”的保稳变换, 以轨迹的动态鞍点(DSP)为能量壁垒点, 可以提供预想故障下的暂态功角稳定裕度和稳定模式信息, 将与暂态功角稳定裕度最小值相对应的稳定模式称为主导模式, 其中稳定模式包括发电机分群和摆次^[16]。各台发电机的暂态功角稳定参与因子可以通过暂态过程中各台发电机动能之间的比例关系来计算, 对于暂态功角稳定主导模式中发电机参与因子的识别分为两种情况^[17]。对于暂态功角稳定裕度小于0的情况, 计算受扰轨迹经过DSP点时主导群中各台发电机的加速动能, 以主导群中发电机加速动能的最大值作为基准, 将主导群中各台发电机的加速动能与该基准值的比值作为各台发电机的参与因子。对于暂态功角稳定裕度大于等于0的情况, 首先要确定受扰轨迹在主导模式中给出的摆次中等值发电机的加速动能达到最大值的时刻, 以该时刻主导群中发电机加速动能的最大值作为基准, 将主导群中各台发电机该时刻的加速动能与该基准值的比值作为各台发电机的参与因子。

2 $N-2$ 组合故障的排序指标

$N-2$ 组合故障中第二个支路元件无故障跳闸会导致第一个元件故障所引起的发电机加速功率发生变化, 其综合影响程度与第一个元件故障的暂态功角稳定裕度、主导群中发电机的参与因子及其有功功率对第二个支路元件有功功率的灵敏度三者紧密相关。本文提出采用式(1)来计算 $N-2$ 组合故障的暂态功角稳定严重程度的排序指标。

$$R_{ij} = (1 - \eta_i) \sum_{k=1}^{M_i} (\lambda_{i,k} S_{p,j,k}) / M_i \quad (1)$$

式中: R_{ij} 为 $N-2$ 组合故障(第一个元件 i 故障、第二个支路元件 j 无故障跳闸)的暂态功角稳定严重程度的排序指标; η_i 为针对第一个元件 i 故障的暂态

功角稳定量化评估得到的暂态功角稳定裕度; M_i 为相应的主导群中发电机的台数; $\lambda_{i,k}$ 为主导群中第 k 个发电机的暂态功角稳定参与因子; $S_{P,j,k}$ 为在第一个元件 i 故障清除后的电力系统运行方式下主导群中第 k 个发电机有功功率对第二个支路元件 j 的有功功率灵敏度。

3 N-2 组合故障集的快速评估

$N-2$ 组合故障的快速评估流程包括 $N-1$ 故障的暂态功角稳定在线评估、 $N-2$ 组合故障的暂态功角稳定严重程度排序指标计算和 $N-2$ 组合故障评估 3 个阶段。

在第 1 阶段中, 首先, 针对 $N-2$ 组合故障集中每个 $N-2$ 组合故障, 假设第二个支路元件无故障跳闸不发生, 即每个 $N-2$ 组合故障分别转变为相应的只有第一个元件故障的 $N-1$ 故障, 相同的 $N-1$ 故障只保留一个, 生成 $N-1$ 故障集; 然后, 针对 $N-1$ 故障集中每个 $N-1$ 故障分别进行基于详细模型时域仿真的暂态功角稳定量化评估, 得到与每个 $N-1$ 故障相应的暂态功角稳定裕度和主导群中发电机组及其参与因子。

在第 2 阶段中, 针对 $N-2$ 组合故障集中每个 $N-2$ 组合故障, 采用式(1)计算其暂态功角稳定严重程度排序指标。

在第 3 阶段中, 首先, 根据 $N-2$ 组合故障的暂态功角稳定严重程度排序指标由大到小的顺序对组合故障进行排序; 然后, 基于并行处理平台优先对排序在前位的组合故障进行基于详细模型时域仿真的暂态功角稳定量化评估, 直至排序号连续且其中排序在最前位的组合故障与排序在最末位的组合故障的排序指标之比大于设定值(例如 1.1)的所有 $N-2$ 组合故障的暂态功角稳定裕度都大于 0, 则判定排序在其后的所有 $N-2$ 组合故障都是暂态功角稳定的, 不需要再进行暂态功角稳定评估, 从而实现 $N-2$ 组合故障集的暂态功角稳定在线快速评估。

4 算例分析

以南方电网的实际运行方式数据为例, 验证本文提出的电力系统 $N-2$ 组合故障快速筛选方法的有效性, 该电网的计算规模为 2 411 个计算节点, 421 台发电机。

全网共 351 条 500 kV 线路, 考虑所有 500 kV 线路的任意 $N-2$ 组合, 对于因 104 个同杆并架双回线而形成的相同的 $N-2$ 组合故障, 只保留其中 1 个组合故障, 双回线自身 $N-2$ 故障亦不考虑, 则 $N-2$

组合故障数为 60 762 个。采用本文提出的故障快速筛选方法, 仅需对 1 017 个故障进行基于详细模型时域仿真的暂态功角稳定评估, 筛选效率接近 98.33%。

受论文篇幅限制, 本文只列出云南和广西联络断面中罗平-百色甲线罗平侧三永作为第一个元件故障时 $N-2$ 组合故障的详细计算结果, 云南 500 kV 电网接线图如图 1 所示。采用电力系统安全稳定量化分析与优化决策软件(FASTEST)计算该 $N-1$ 故障的暂态功角稳定裕度为 2.06%, 主导群中有 98 台机组, 各个发电机的参与因子(仅列出参与因子大于 0.15 的机组)见表 1。

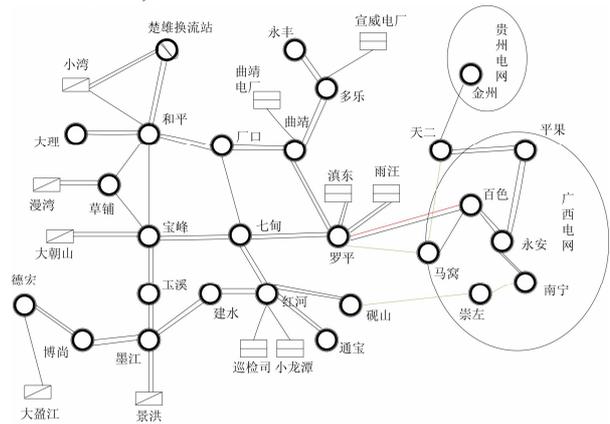


图 1 云南 500 kV 电网接线图

Fig. 1 Wiring diagram of 500 kV Yunnan power system

表 1 主导群中发电机的参与因子

Table 1 Participation factor of generators in the critical cluster

发电机	参与因子	发电机	参与因子
XIAOW3G_	1	GGQ1G_	0.268 342
XIAOW4G_	0.997 247	JH2G_	0.266 148
XIAOW1G_	0.996 408	JH4G_	0.265 771
XIAOW2G_	0.995 956	MW2G_	0.265 338
XIAOW5G_	0.994 215	JH1G_	0.265 271
XIAOW6G_	0.993 741	DCS2G_	0.230 94
JAQ4G_	0.846 212	DCS1G_	0.230 865
JAQ3G_	0.845 607	DCS3G_	0.230 669
JAQ1G_	0.844 507	KM22G_	0.230 468
JAQ2G_	0.844 008	DCS4G_	0.230 437
NZD9G_	0.580 673	XW10G_	0.228 819
MW1G_	0.374 546	DCS5G_	0.212 389
MW3G_	0.316 602	DCS6G_	0.211 112
MW4G_	0.289 051	GGQ4G_	0.193 753
MW6G_	0.287 33	QJ2G_	0.189 8
MW5G_	0.285 266	KY2G_	0.187 816
JH5G_	0.275 564	YZH1G_	0.184 868
GGQ2G_	0.268 399	XLT7G_	0.167 728
GGQ3G_	0.268 396		

针对上述 $N-1$ 故障, 先根据该故障的暂态功角

稳定裕度和主导群中各台发电机的参与因子及其有功功率对第二个开断元件有功变化量的灵敏度, 计算所有 $N-2$ 组合故障(共 246 个故障)的暂态功角稳定严重程度排序指标, 再基于并行处理平台优先对排序在前面的组合故障进行暂态功角稳定评估。计算结果详见表 2。表 2 中还列出了暂态功角稳定排序指标靠前的 15 个组合故障的评估结果。实际上当前 5 个故障暂态功角稳定评估后即可判断剩余组合故障均暂态功角稳定(第 4 个组合故障的排序指标与第 5 个组合故障的排序指标之比大于 1.1)。

表 2 $N-2$ 故障的暂态功角稳定排序指标和暂稳仿真结果

Table 2 Transient angle stability ranking index and simulation

results of $N-2$ contingencies			
序号	第二个开断元件	暂稳排序指标	$N-2$ 故障暂稳仿真结果
1	天马线	0.070 554 5	失稳
2	罗马线	0.068 101 2	失稳
3	砚崇甲线	0.048 092 6	失稳
4	崇南甲线	0.043 887 3	稳定
5	和厂二回	0.033 419	稳定
6	曲靖罗平二线	0.028 984 2	稳定
7	七罗二线	0.027 435 6	稳定
8	宝七二线	0.022 697 2	稳定
9	草宝甲线	0.021 998 2	稳定
10	厂口曲靖二回	0.021 998 2	稳定
11	红砚甲线	0.021 084 7	稳定
12	南玉二线	0.019 369 7	稳定
13	草和乙线	0.016 541	稳定
14	天平二线	0.014 030 5	稳定
15	平来二线	0.013 587 1	稳定

采用 FASTEST 软件对除表 2 外其余判断暂态功角稳定的剩余故障进行基于详细模型时域仿真的暂态功角稳定评估, 计算结果均为稳定, 这也证明了本文提出的 $N-2$ 组合故障排序及快速评估方法的有效性。从图 1 接线图中也可以看出, 罗百甲、乙线与天马线、罗马线、砚崇甲线等为同一输电断面, 当出现两条输电线路故障时对系统安全性的影响最大。

上述算例考虑的第一个元件故障是 500 kV 线路三永故障, 如考虑南方电网可能发生的直流系统故障(如直流闭锁), 则本文算法完全可以满足要求。

5 结论

本文基于互补群群际能量壁垒准则和发电机暂态功角稳定参与因子计算方法提出了 $N-2$ 组合故障集的暂态功角稳定快速评估方法。该方法能够有效筛选出严重的 $N-2$ 组合故障集, 从而大大降低了当前方式下需要基于详细模型时域仿真计算暂态功角

稳定性的 $N-2$ 组合故障规模, 提高了电力系统暂态功角稳定评估的计算速度。

该方法对支路无故障跳闸时间、其他类型的第二个故障元件以及其他非无故障跳闸故障的适应性还需要在后续研究工作中进一步考虑。

参考文献

- [1] 薛禹胜, 谢云云, 文福拴, 等. 关于电力系统相继故障研究的评述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(19): 1-9.
XUE Yusheng, XIE Yunyun, WEN Fushuan, et al. A review on cascading failures in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(19): 1-9.
- [2] 印永华, 郭剑波, 赵建军, 等. 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.
YIN Yonghua, GUO Jianbo, ZHAO Jianjun, et al. Preliminary analysis of large scale blackout in interconnected north america power system on August 14 and lessons to be drawn[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 8-11.
- [3] 刘友波, 胡斌, 刘俊勇, 等. 电力系统连锁故障分析理论与应用(一)—相关理论方法与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 148-155.
LIU Youbo, HU Bin, LIU Junyong, et al. Power system cascading failure analysis theories and application I—related theories and applications[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 148-155.
- [4] 刘友波, 胥威汀, 丁理杰, 等. 电力系统连锁故障分析理论与应用(二)—关键特征与研究启示[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 146-155.
LIU Youbo, XU Weiting, DING Lijie, et al. Power system cascading failure analysis theories and application II—key features of real cascading failures and revelation aspects[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 146-155.
- [5] 方勇杰. 美国“9·8”大停电对连锁故障防控技术的启示[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 1-7.
FANG Yongjie. Lessons from the September 8, 2011 southwest America blackout for prevention and control of cascading outages[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 1-7.
- [6] 汤涌, 卜广全, 易俊. 印度“7·30”、“7·31”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 167-174.
TANG Yong, BU Guangquan, YI Jun. Analysis and lessons of the blackout in India power grid on July 30 and 31, 2012[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25):

- 167-174.
- [7] 陈恩泽, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 多重扰动下的跨区电网低频振荡研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 290-296. CHEN Enze, LIU Dichen, LIAO Qingfen, et al. Research on low frequency oscillation of interconnected power grid based on multiple disturbances[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 290-296.
- [8] CHIANG H D, WANG C S, LI Hua. Development of BCU classifiers for on-line dynamic contingency screening of electric power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(2): 660-666.
- [9] 卢锦玲, 朱永利. 基于暂态能量裕度的电力系统脆弱性评估[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6): 96-103. LU Jinling, ZHU Yongli. Power system vulnerability assessment based on transient energy margin[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(6): 96-103.
- [10] 顾雪平, 曹绍杰, 张文勤. 人工神经网络和短时仿真结合的暂态安全评估故障筛选方法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(8): 16-19. GU Xueping, CAO Shaojie, ZHANG Wenqin. Integration of ANNs and short-duration numerical simulation for contingency screening of transient security assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(8): 16-19.
- [11] 刘影, 王涛, 顾雪平. 基于边韧性度的电力系统关键线路筛选[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(6): 92-96, 103. LIU Ying, WANG Tao, GU Xueping. Screening of critical lines in power systems based on the edge tenacity index[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6): 92-96, 103.
- [12] 王成山, 曹旌, 陈光远. 基于聚类分析的电力系统暂态稳定故障筛选[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 18-22. WANG Chengshan, CAO Jing, CHEN Guangyuan. Power system transient stability contingency screening based on clustering analysis[J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 18-22.
- [13] 吕志来, 张保会, 哈恒旭. 模糊子集和Taylor级数相结合的快速事故筛选方法[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(22): 16-20. LÜ Zhilai, ZHANG Baohui, HA Hengxu. Integration of fuzzy set theory and Taylor series expansions for contingency screening of transient stability assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(22): 16-20.
- [14] 王守相, 张伯明, 郭琦. 在线动态安全评估中事故扫描的综合性能指标法[J]. 电网技术, 2005, 29(1): 60-63. WANG Shouxiang, ZHANG Boming, GUO Qi. Integrated performance index method of contingency screening in online dynamic security assessment[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 60-63.
- [15] 王守相, 张建军. 基于统计学习的模糊暂态稳定事故筛选与排序[J]. 电工技术学报, 2006, 21(3): 112-117. WANG Shouxiang, ZHANG Jianjun. Fuzzy contingency filtering and ranking of power system transient stability based on statistical learning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(3): 112-117.
- [16] 薛禹胜. 非自治非线性多刚体系统运动稳定性的定量分析[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(1)-1999, 23(14). XUE Yusheng. Quantitative study of general motion stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(1)-1999, 23(14).
- [17] 徐泰山, 薛禹胜, 鲍颜红, 等. 电力系统暂态安全稳定模式中元件参与因子识别方法: 中国, CN200910026801.4[P]. 2009-06-01. XU Taishan, XUE Yusheng, BAO Yanhong, et al. Participation factor identification method of the component in power system transient security and stability mode: China, CN200910026801.4[P]. 2009-06-01.
- [18] 徐泰山, 薛禹胜, 李碧君, 等. 暂态稳定在线预警故障集的自适应筛选[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(22): 1-4. XU Taishan, XUE Yusheng, LI Bijun, et al. On-line adaptive contingency screening for early-warning of transient stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22): 1-4.

收稿日期: 2014-06-25; 修回日期: 2014-08-30

作者简介:

徐泰山(1968-), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制; E-mail: xutaishan@sgepri.sgcc.com.cn

鲍颜红(1971-), 男, 博士研究生, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制;

杨莹(1986-), 女, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制. E-mail: yolanda_young@126.com

(编辑 魏小丽)