

中心点, 将离中心点最近的方式作为该簇的基准方式;
(8) 如果基准方式不再变化或者达到最大迭代聚

类次数结束, 否则, 按新的基准方式形成基准方式集合, 重复步骤(4)至步骤(7).

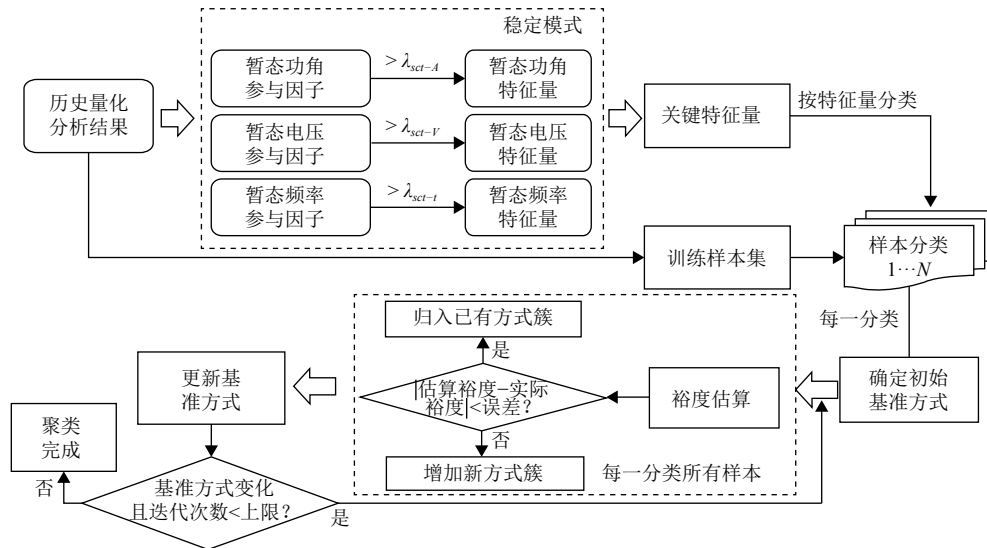


图2 方式聚类流程图

4 方式分类和裕度估算

基于前述的关键特征量的选择方法, 通过关键特征量找到与当前电网实时运行方式接近的历史运行方式簇, 进一步根据当前电网实时运行方式与历史运行方式之间的差异, 结合历史运行方式的暂态稳定裕度情况, 快速估算当前电网实时运行方式的暂态稳定裕度, 具体步骤如下:

1) 根据考核的故障, 比较当前实时运行方式与各聚类基准方式的关键设备投停状态是否一致, 如果一致则计算与该聚类基准方式的加权距离, 选取距离大于阈值且最小的方式簇, 从而得到当前实时运行方式所属的方式簇. 如果当前实时运行方式未匹配到任何历史方式簇, 则必须对当前电网实时运行方式进行详细的仿真分析.

2) 从匹配到的历史运行方式簇, 选取其中历史运行方式及其暂态稳定分析结果, 根据在线方式与历史运行方式之间的关键特征量的差异, 采用基于历史分析结果的暂态稳定裕度快速估算方法, 估算当前电网运行方式的暂态稳定裕度, 估算方法参见文献[3].

对于特征值向量 X , 由于每个分量对于稳定性的影响是不同的, 因此, 在计算当前方式与基准方式的距离时需要考虑每个分量的权重. 实际分配权重有两种方式, 一是以基准方式各状态量的参与因子作为权重,

二是以该聚类所有方式状态量参与因子的均值作为权重. 对应的距离公式分别为:

$$D(X, Y) = \sqrt{\gamma_1 x_1 - y_1^2 + \gamma_2 x_2 - y_2^2 + \dots + \gamma_n x_n - y_n^2} \quad (1)$$

$$D(X, Y) = \sqrt{\bar{\gamma}_1 x_1 - y_1^2 + \bar{\gamma}_2 x_2 - y_2^2 + \dots + \bar{\gamma}_n x_n - y_n^2} \quad (2)$$

式中, X 为当前方式特征值向量, Y 为基准方式特征值向量, γ_n 为基准方式各状态量 y_n 对应的参与因子, $\bar{\gamma}_n$ 为该聚类所有方式状态量 y_n 对应的参与因子均值.

5 工程实例

以某省级电网为例, 选择共 12 256 个运行方式及其计算结果构建训练样本, 其中安全样本 (裕度大于 10) 10 818 个, 预警样本 (裕度大于 0 且小于 10) 68 个, 不安全样本 (裕度小于 0) 1370 个. 选择共 851 个运行方式作为测试集. 针对指定的测试故障进行裕度快速评估, 训练样本分布图如图 3.

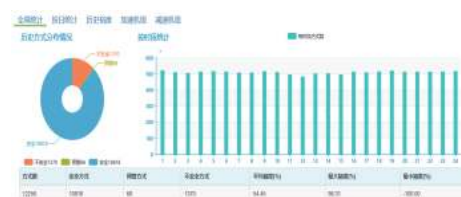


图3 训练样本分布图

根据前述的基于量化分析的暂态稳定特征量选择方法,提取包括116台机组有功值、7条线路的有功值共123个特征量作为暂态功角稳定的关键特征量。

根据前述的电网历史运行方式聚类方法,对测试故障下的共12256个训练样本集历史运行方式进行历史方式聚类,其中,聚类的依据为:

(1) 根据量化分析结果,测试故障下对应的加速群机组投运状态一致;

(2) 该故障对应的关键特征量中,选取的重要联络线投运状态一致;

(3) 聚类的暂态功角稳定裕度阈值设为 $\pm 5.0\%$,即各簇内的暂态功角稳定裕度最大差值不超过10%。

经前述考虑电网暂态稳定模式的电网历史运行方式聚类方法,12256个训练样本集共聚类成462个簇,其中部分簇内包含的历史样本较少。方式聚类分布图如图4。

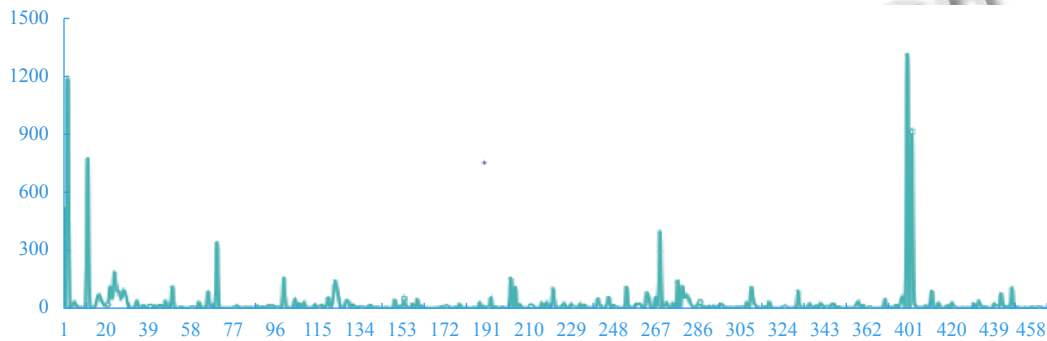


图4 方式聚类分布图

分别比较测试集中各方式与各聚类簇中历史方式的加速群机组投运状态、重要联络线投运状态,在加速群机组投运状态、重要联络线投运状态均一致的若干个簇中,计算测试集方式与簇内运行方式之间的方式距离,作为测试集方式的目标方式。进一步根据测试集方式与目标方式之间的运行方式差异,利用基于方式差异和历史分析结果的暂态稳定裕度快速估算方法,得出测试集方式的裕度及其稳定性结论。

将在线快速评估估算结果与实际仿真结果进行比较,测试集共851个样本。

按照式(1)计算距离进行方式匹配,结果如图5和图6。



图5 快速评估估算结果与实际仿真结果裕度比较结果1

共有34个测试样本出现错判,判断准确率为96%(817/851),误判率为4%(34/851),其中:



图6 快速评估估算结果与实际仿真结果裕度误差统计1

(1) 实际时域仿真分析结果为暂态功角稳定,快速评估估算结果判为失稳的共28个样本,误判率3.3%(28/851);

(2) 实际时域仿真分析结果为暂态功角失稳,快速评估估算结果判为稳定的共6个样本,漏警率0.70%(6/851)。

统计在线快速评估估算结果与实际仿真结果之间暂态功角稳定裕度结果之间的差异,两者之间的裕度平均绝对误差为16.94%,相对误差为1%。

按照式(2)计算距离进行方式匹配,结果如图7和图8。

共有6个测试样本出现错判,判断准确率为99.3%(845/851),误判率为0.7%(6/851),其中:

(1) 实际时域仿真分析结果为暂态功角稳定,快速评估估算结果判为失稳的共0个样本,误警率0%

(0/851);

(2) 实际时域仿真分析结果为暂态功角失稳, 快速评估估算结果判为稳定的共 6 个样本, 漏警率 0.70% (6/851).

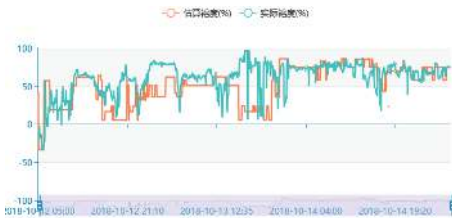


图7 快速评估估算结果与实际仿真结果裕度比较结果 2



图8 快速评估估算结果与实际仿真结果裕度误差统计 2

统计在线快速评估估算结果与实际仿真结果之间暂态功角稳定裕度结果之间的差异, 两者之间的裕度平均绝对误差为 18.01%, 相对误差为 0.66%.

从误差率的角度来看, 显然用式 (2) 比式 (1) 效果更好.

6 结论与展望

本文提出了一种安全稳定裕度快速估算方法. 首先基于海量历史评估结果和安全稳定机理提取与电网暂态稳定性密切相关的关键特征量, 其次然后对各故障按特征量进行方式聚类, 生成电网安全运行知识库, 最后基于知识库对当前方式下故障进行自动匹配和裕度快速估算. 通过具体工程实例说明上述方法的工程应用步骤和实际效果. 由于方式聚类时用到了评估结果中的裕度信息, 而新方式匹配时缺少这一信息, 工程上用特征量之间的加权距离进行匹配, 这可能是结果误差的主要来源, 不同距离计算方法会影响估算结果

的准确性, 后续还要进一步分析和研究.

参考文献

- 孙宏斌, 黄天恩, 郭庆来, 等. 基于仿真大数据的电网智能型超前安全预警技术. 南方电网技术, 2016, 10(3): 42-46.
- 徐泰山, 鲍颜红, 杨莹, 等. N-2 组合故障集的暂态功角稳定在线快速评估. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 122-126. [doi: 10.7667/j.issn.1674-3415.2015.07.019]
- 徐泰山, 段荣华, 鲍颜红, 等. 基于预想故障集自动筛选的在线暂态安全稳定评估方法: 中国, CN201710247481.X. [2017-08-25].
- Tüfekci P. Prediction of full load electrical power output of a base load operated combined cycle power plant using machine learning methods. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 60: 126-140.
- Ding N, Benoit C, Foggia G, et al. Neural network-based model design for short-term load forecast in distribution systems. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 72-81. [doi: 10.1109/TPWRS.2015.2390132]
- Morales J A, Orduña E, Rehtanz C. Classification of lightning stroke on transmission line using multi-resolution analysis and machine learning. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 58: 19-31.
- Bosse S, Maniry D, Müller KR, et al. Deep neural networks for no-reference and full-reference image quality assessment. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, 27(1): 206-219. [doi: 10.1109/TIP.2017.2760518]
- 李国杰. 大数据研究的科学价值. 中国计算机学会通讯, 2012, 8(9): 8-15.
- 顾雪平, 曹绍杰, 张文勤. 神经网络和短时仿真结合的暂态安全评估事故筛选方法. 电力系统自动化, 1999, 23(8): 16-19. [doi: 10.3321/j.issn:1000-1026.1999.08.004]
- 黄天恩, 孙宏斌, 郭庆来, 等. 基于电网运行大数据的在线分布式安全特征选择. 电力系统自动化, 2016, 40(4): 32-40. [doi: 10.7500/AEPS20150424003]
- 国家电网公司, 国网湖南省电力公司, 中国电力科学研究院. 基于历史数据的电力系统稳定性快速判断方法: 中国, CN201511030190.2[P]. [2016-03-16].
- 蒋维勇, 孙宏斌, 张伯明, 等. 电力系统精细规则的研究. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 1-7. [doi: 10.3321/j.issn:0258-8013.2009.04.001]