

DOI: 10.7667/PSPC161276

应用模糊聚类的电力系统网络重构分析

马兆兴¹, 李洪美², 陈昊³

(1. 青岛理工大学自动化工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 江苏师范大学电气工程及自动化学院, 江苏 徐州 221116; 3. 江苏省电力公司检修分公司, 江苏 南京 210093)

摘要: 以提高电力系统电压稳定裕度为目的, 基于模糊聚类方法对网络重构进行分析。若系统网络发生故障(如某联络线发生短路、过载等)或因不确定性问题引起其他网络故障, 应迅速切除。为不影响负荷供电, 需要其他线路替代故障点, 但此时可能有多种候选方案。应用模糊聚类方法将众多候选支路予以分类, 在最大限度提高电压稳定裕度的基础上选取最为合适的候选支路, 以完成网络重构。应用 IEEE-30 节点系统验证所提模糊聚类分析方法的正确性和有效性。

关键词: 网络优化; 电力系统; 稳定裕度; 聚类分析; 重构

Research on network reconfiguration of power system with fuzzy clustering

MA Zhaoxing¹, LI Hongmei², CHEN Hao³

(1. College of Automation Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China;
2. School of Electrical Engineering & Automation, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China;
3. Maintenance Company of Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210093, China)

Abstract: In order to improve the voltage stability margin of power system, the network reconfiguration is proposed based on fuzzy clustering. The network accident (such as a tie line short circuited or overload) or other network failures occurred due to uncertainty should be removed quickly. It needs other lines replace the fault point to avoid interrupting the power supply. But there are a variety of candidate solutions at this moment. This paper proposes a fuzzy clustering method to classify many candidate branches, and selects the most candidate branch on the basis of improving voltage stability margin at a maximum to complete the network reconfiguration. The proposed method is tested in IEEE 30-bus system to show its feasibility and validity.

This work is supported by Natural Science Research Foundation of Jiangsu Universities (No. 14KJB470003 and No. 16KJB470004).

Key words: network optimization; power system; stability margin; clustering analysis; reconfiguration

0 引言

近年来, 欧美等国先后发生了较为严重的停电事故, 我国也出现了因自然灾害导致的大面积设备损坏和跳闸事故, 这些给人民生活 and 国民经济均造成巨大损失, 给电力系统的稳定运行敲响了警钟。现代社会的发展对电力的需求和依赖越来越大, 对安全稳定供电的要求也越来越高。尤其是随着能源新技术的快速发展, 大量新能源并网和电动汽车的

接入等给电网带来更多不确定性问题, 给系统稳定运行, 提出了新的挑战, 因此需要深入研究分析负荷随时间变化的动态重构问题。从根本上说, 电网因不确定性而发生事故是不可避免的, 对于电力系统安全运行控制来说, 最大限度地提高电网运行稳定裕度, 可以有效避免诸如停电和设备损坏事故的发生。

电力系统若发生较大故障, 需要迅速切除, 在不影响负荷供电的情况下, 需对网络进行优化重构, 以平衡各线路负荷和降低网损, 提高系统电压稳定裕度, 从而提高网络的供电能力。电力系统网络重构是一个复杂大规模非线性组合问题, 因此其分析

难度较大。有些研究者在分析网络重构^[1-2]过程中,对配电网的可靠性、稳定性、负荷预测进行了分析^[3-4];文献[5]应用模糊 C-均值聚类方法研究了分布式系统的网络重构,分析过程中考虑了年能量损失最小。

文献[6]从提高电压稳定性的角度对所有时间断面进行物理寻优,但缺少对开关操作次数的考虑;文献[7]提出一个基于 Gerschgorin 圆盘定律估计的聚类有效性指标来估计模糊聚类的类数,基于圆盘定律估计最优的类数。文献[8]构建了配电网最大供电能力评估指标,依次提出了面向最大供电能力提升的配电网主动重构策略。文献[9]应用综合性能指标,提出了一种兼顾经济性和电能质量的网络重构方法;文献[10]引入模糊隶属度函数对各目标进行模糊化处理,建立多目标协调优化的配电网网络重构模型。

在上述背景下,本文提出了以提高电力系统稳定裕度为目的,基于模糊聚类的网络重构分析。若系统网络发生故障(如某联络线发生短路或因不确定性问题引起其他网络故障),应迅速切除,此时需要线路替代故障点,但可能有多种候选方案,文中应用模糊聚类方法将众多候选支路予以分类,在最大限度提高稳定裕度的基础上选取最为合适的候选支路,以完成网络重构,因此本文研究的网络重构并非全系统重构,而是针对故障部分或重载线路进行的部分网络重构。本文的重构目标是找到电压稳定裕度最大的网络部分,为调度运行人员实施重构过程作指导分析,结果更具有实际意义,并在 IEEE-30 节点测试系统上分析验证模糊聚类算法对网络重构的影响,结果表明,所提方法有较好的优化效果。

1 电力系统网络重构及电压稳定裕度分析

1.1 电力系统网络重构分析

电力系统网络重构^[11]是一个涉及多方面因素的优化问题,从数学优化的角度讲,其规模大、难度高,求解较为困难。在重构过程中需要考虑的技术因素较多,如线路的充电无功、设备的操作时间、重负荷地区线路的传输能力等。重构的目标是找出电源、负荷和线路的理想组合形成新的网络连接,作为调度运行人员实施重构操作的目标或依据。本文针对电力系统经常出现的故障或紧急情况(如发生短路或断线等),需迅速切断故障线路(点),换作其他线路连接,在较多候选线路条件下,以最大化提高稳定裕度为目的,应用模糊聚类方法选取最为合适的线路。本文重构分析的目的是找到一个稳定

裕度最优或次优的骨架网络。

1.2 电压稳定裕度分析

现代电力系统分析中,描述系统静态电压稳定的系统潮流方程为

$$0 = g(x, y, \tau) \quad (1)$$

式中: x 为状态量; y 为代数量; τ 为参量。

衡量式(1)所描述系统的电压稳定裕度,本文应用求取关键特征值^[12]的方法。若所求取关键特征值实部在虚轴左侧,且偏离零点越大则系统电压稳定裕度越大;反之,稳定裕度越小;若有存在虚轴右侧的特征值,则系统失稳。应用关键特征值方法判断系统稳定裕度能够减小计算量,提高分析效率。

2 基于模糊聚类的网络重构分析

模糊聚类分析是一类无监督式的学习技术^[13-14],目的是把一个模式集中,具有类似特征的模式划分到相同类而把不同特征的模式划分到不同类。因此,本文应用模糊聚类分析对重构网络进行优化分析。

设发电机节点数为 N_G 、负荷数为 N_L 、支路数为 N_B 的网络系统,基于系统静态方程关键特征值矩阵的构成步骤^[15-17]如下所述。

步骤 1: 若支路 i 过载或故障需切除,有 m 条候选支路可供选择以替换支路 i 继续供电,现从 m 条支路中任意选取 2 条(或多条)替换支路 i 继续供电,共有 C_m^2 种选择,除去潮流约束和运行约束等约束条件,最终将有小于或等于 C_m^2 种选择。

步骤 2: 建立雅克比矩阵,计算任何一种选择 j 的关键特征值,对于每种选择有 k 个关键特征值(若所计算的关键特征值中存在实部不为负的,则放弃该选择支路),这里只选取代表稳定状态的特征值实部,即组成了 k 维的向量 $\mathbf{P}_j = [\lambda_{j1}, \lambda_{j2}, \dots, \lambda_{jk}]'$,并记 $P_{j\sum}$ 为向量各元素的代数和。

步骤 3: 对于电网中的 C_m^2 种支路选择,每一种选择均有一组关键特征值,由这些组成矩阵 \mathbf{P} 。

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \cdots & \lambda_{1k} \\ \vdots & & \vdots \\ \lambda_{\frac{m(m-1)}{2}1} & \cdots & \lambda_{\frac{m(m-1)}{2}k} \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据准则函数值确定最优聚类中心数以及相应的聚类结果,从而实现无需事先给定聚类中心数即可聚类的随机模糊聚类算法。划分熵指数公式为

$$H_p = -\frac{1}{N_B} \sum_{j=1}^{N_B} \sum_{t=1}^T (u_{jt} \ln u_{jt}) \quad (3)$$

式中: H_p 的取值范围为 $[0, \ln T]$; T 为当前分类数,

其取值范围为 $[2, T_{\max}]$, 其中 T_{\max} 为最大分类数; u_{jt} 为线路隶属于第 j 个聚类中心的隶属度。

当分类数 T 固定时, 若线路关于某类的隶属度越大, 而关于其他类的隶属度越小, H_p 越接近于0, 则聚类越硬; 当线路隶属于每个聚类中心的隶属度均相同时, H_p 值为 $\ln T$, 聚类最模糊, 无法判断线路隶属于哪个中心。对其进行基于划分熵指数为准则函数的模糊聚类以获得合适的候选输电支路, 其步骤如下所述。

步骤 1: 初始分类数 $T=2$, 给定 T_{\max} 。

步骤 2: 计算构成向量 $P_{j\sigma}$ 元素代数和序列 S_j , 其中最大、最小值分别记为 S_{\max} 、 S_{\min} 。

步骤 3: 计算当前初始聚类中心, $k=0$, 计算线路 j 归一化模值。

步骤 4: 计算当前线路构成向量 $P_{j\sigma}$ 隶属于第 t 个聚类中心 $C_t^{(k)}$ 的隶属度 $u_{jt}^{(k)}$, 即

$$u_{jt}^{(k)} = \frac{1}{\sum_{r=1}^T \left(\frac{\|P_{j\sigma} - C_r^{(k)}\|}{\|P_{j\sigma} - C_t^{(k)}\|} \right)^{\frac{2}{m-1}}}, \quad m \in (1, \infty) \text{ 是加权指数。}$$

步骤 5: 令 $k = k + 1$, 更新聚类中心。

步骤 6: 若 $\forall t \in \{1, 2, \dots, T\}$, 均有 $|C_t^{(k+1)} - C_t^{(k)}| < \varepsilon$, 则得到对应于分类数为 T 时的聚类结果, 转步骤 7; 否则转步骤 4。

步骤 7: 计算划分熵指数 $E_p^{(T)}$, 则有

$$E_p^{(T)} = -\frac{1}{N_B} \sum_{j=1}^{N_B} \sum_{t=1}^T \left(u_{jt}^{(k)} \ln u_{jt}^{(k)} \right)。$$

步骤 8: $T = T + 1$, 若 $T < T_{\max}$, 转步骤 3; 否则得到 T 与 $E_p^{(T)}$ 的关系曲线, 转步骤 9。

步骤 9: 计算 T 不同取值时的曲率 $K^{(T)}$, 当 $K^{(T)}$ 最大时, 对应的点为 $(T_{\text{best}}, E_p^{(T_{\text{best}})})$, 即为曲线递增曲率显著变化点, 此时 T 值即为最佳分类数 T_{best} 。

经过模糊聚类后, 能最大化提高电压稳定裕度的一类支路组成了合适的候选输电支路。若最后所确定的聚类中仍含有多条线路可供选择, 则以损耗最小为基础选择一条最优线路。另外本文给出的网络重构分析方法也要满足潮流方程约束、支路容量约束、节点电压约束和网络辐射状态运行约束。

3 算例分析

将本文所提方法用于 IEEE-30 节点系统, 利用

Matlab 对其进行仿真计算。该节点系统含有 30 个节点, 41 条支路, 系统接线如图 1 所示。本文从模糊聚类数和电压稳定裕度两个方面对电力系统网络重构条件下电压稳定裕度的影响进行详细分析。

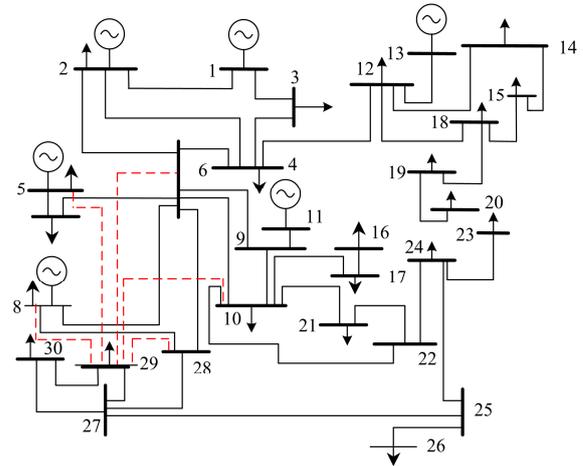


图 1 IEEE-30 节点系统接线图

Fig. 1 IEEE 30-bus simple diagram

1) 情况 1

在负荷中心, 若线路 27-29 发生短路, 迅速切除该线路, 为给负荷节点 29 继续供电, 可能的重构线路有: 8-29、6-29、5-29、28-29、10-29(分别在图 1 中红色虚线所示), 应用聚类分析的计算结果如表 1 所示。表 1 将可能的重构线路分为两个聚类, 聚类 1 表示电压稳定裕度更大的优先线路。

表 1 聚类分析计算结果

聚类	聚类线路
聚类 1	8-29、5-29
聚类 2	6-29、28-29、10-29

依据表 1 的计算结果, 在不同聚类中分别选取 8-29、6-29 替换故障线路 27-29 继续供电, 以比较选取不同线路重构后对系统电压稳定裕度的影响, 则重构后组成网络系统的关键特征值计算结果如表 2 所示。

表 2 关键特征值计算结果

重构线路	关键特征值	重构线路	关键特征值
8-29	-1.559±j1.3739	6-29	-0.99241±j0.0431
	-1.2799±j1.8137		-0.65044±j0.37942
	-0.99112		-0.60524
	-0.93488		-0.21564

由表 2 的计算结果可知, 按照表 1 的聚类 1 计算结果选取 8-29 作为替换线路, 所计算关键特征值表明系统电压稳定裕度明显大于选取聚类 2 中的 6-29 替换线路的电压稳定裕度, 也表明了所应用聚类分析方法的正确性和有效性。

2) 情况 2

联络线 10-17 过载, 为不影响节点 16、17 的供电, 需用其他联络线承担负荷, 可能的重构线路有: 4-17、9-17、11-17、19-17, 应用聚类分析的计算结果如表 3 所示。表 3 将可能的重构线路分为两个聚类, 聚类 1 表示电压稳定裕度更大的优先线路。

表 3 聚类分析计算结果

Table 3 Simulation results of clustering analysis

聚类	聚类线路
聚类 1	9-17、4-17
聚类 2	11-17、19-17

依据表 3 的计算结果, 在不同聚类中分别选取 9-17、19-17 替换故障线路 10-17 继续供电, 以比较选取不同线路重构后对系统电压稳定裕度的影响, 则重构后组成网络系统的关键特征值计算结果如表 4 所示。

表 4 关键特征值计算结果

Table 4 Results of critical eigenvalue

重构线路	关键特征值	重构线路	关键特征值
9-17	-0.859 13±j0.382 08	19-17	-0.610 29±j0.6689
	-0.8062±j0.688 78		-0.6718±j0.387 22
	-0.7849		-0.536
	-0.414 56		-0.202 59

由表 4 的计算结果可知, 按照表 3 的聚类 1 计算结果选取 9-17 作为替换线路, 所计算关键特征值表明系统的稳定裕度明显大于聚类 2 中选取 19-17 作为替换线路的稳定裕度, 这也表明了所应用聚类分析方法的正确性和有效性。

4 结论

本文提出了模糊聚类方法研究系统网络重构, 分析过程中, 在众多候选支路中选取能最大限度提高电压稳定裕度的重构方法。仿真结果表明: 文中所提的模糊聚类方法能较为准确地将候选支路进行聚类, 并且优选的聚类能较为明显地提高系统电压稳定裕度, 这也表明了文中所提分析方法的正确性和有效性。

在以后的进一步研究中, 将考虑具有不确定性的风电、光伏发电等新能源并网对电力系统配电网

络重构的影响。

参考文献

[1] 王晓旭, 郝文斌, 腾予非, 等. 小方式下基于高压电网结构调整的新型电压控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 72-77.
WANG Xiaoxu, HAO Wenbin, TENG Yufei, et al. A new approach to voltage control based on HV grid transmission network reconfiguration during light load period[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 72-77.

[2] 李志, 章禹, 暴英凯, 等. 兼顾均匀性的多目标配电网重构方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 69-75.
LI Zhi, ZHANG Yu, BAO Yingkai, et al. Multi-objective distribution network reconfiguration based on system homogeneity[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 69-75.

[3] 李培强, 李欣然, 陈辉华, 等. 基于模糊聚类的电力负荷特性的分类与综合[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 73-78.
LI Peiqiang, LI Xinran, CHEN Huihua, et al. The characteristics classification and synthesis of power load based on fuzzy clustering[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 73-78.

[4] MA Zhaoxing, GU Wei, WAN Qiulan. Study on power system small-disturbance uncertainty stability considering wind power[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2014, 9: 123-128.

[5] TAHBOUBA M, PANDIV R, ZEINELDINH H. Distribution system reconfiguration for annual energy loss reduction considering variable distributed generation profiles[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(4): 1677-1686.

[6] MISTRY K, ROY R. Enhancement of voltage stability index of distribution system by network reconfiguration including static load model and daily load curve[C] // Innovation Smart Grid Technology. Kollam, India: IEEE Power Electronics Society, 2011: 17-22.

[7] 岳士弘, 黄媿, 王鹏龙. 基于矩阵特征值分析的模糊聚类有效性指标[J]. 天津大学学报, 2014, 47(8): 589-596.
YUE Shihong, HUANG Ti, WANG Penglong. Matrix eigenvalue analysis-based clustering validity index[J]. Journal of Tianjin University, 2014, 47(8): 589-596.

[8] 靳小龙, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 面向最大供电能力提升的配电网主动重构策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 137-149.

- JIN Xiaolong, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. An active reconfiguration strategy for distribution network based on maximum power supply capability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 137-149.
- [9] 田昊, 吕林, 高红均, 等. 计及电网运行特性的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 9-15.
TIAN Hao, LÜ Lin, GAO Hongjun, et al. Dynamic reconfiguration of distribution network considering power grid operation characteristic[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 9-15.
- [10] 刘志勇, 刘杨华, 林舜江, 等. 基于模糊多目标协调优化的配电网重构研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 133-138.
LIU Zhiyong, LIU Yanghua, LIN Shunjiang, et al. Fuzzy multi-objective coordination optimization for distribution network reconfiguration[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 133-138.
- [11] 刘艳, 顾雪平. 基于节点重要度评价的骨架网络重构[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 20-27.
LIU Yan, GU Xueping. Node importance assessment based skeleton-network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 20-27.
- [12] 郑伟, 王克文. 基于精华 Arnoldi 方法的小信号稳定性关键特征值计算[J]. 继电器, 2007, 35(4): 40-43.
ZHENG Wei, WANG Kewen. Application of the refined Arnoldi method to the calculation of critical eigenvalues in small signal stability analysis[J]. Relay, 2007, 35(4): 40-43.
- [13] 王淳, 高元海. 采用最优模糊 C 均值聚类和改进化学反应算法的配电网动态重构[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1682-1692.
WANG Chun, GAO Yuanhai. Dynamic reconfiguration of distribution network based on optimal fuzzy C-means clustering and improved chemical reaction optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1682-1692.
- [14] AI Qian, FAN Songli, PIAO Longjian. Optimal scheduling strategy for virtual power plants based on credibility theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 8pp.
DOI 10.1186/s 41601-016-0017-X
- [15] 林济铿, 杨添凯, 胡世俊, 等. 基于模糊聚类和最短路径的关键输电断面确定新方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 134-140.
LIN Jikeng, YANG Tiankai, HU Shijun, et al. A new fast search method of key power flow transfer section based on random fuzziness clustering algorithm and shortest path algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 134-140.
- [16] 谢开贵, 周家启. 基于有向通路的潮流跟踪新方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(11): 88-92.
XIE Kaigui, ZHOU Jiaqi. A new power flow tracing method based on directed path[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(11): 88-92.
- [17] 魏萍, 倪以信, 吴复立, 等. 基于图论的输电线路功率组成和发电机与负荷间功率输送关系的快速分析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 21-25.
WEI Ping, NI Yixin, WU Fuli, et al. Power transfer allocation for open access using graph theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 21-25.

收稿日期: 2016-08-11; 修回日期: 2017-05-10

作者简介:

马兆兴(1982—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为电力系统稳定性分析、运行与智能电网; E-mail: mazhaoxingapple@126.com

李洪美(1969—), 女, 通信作者, 博士, 讲师, 主要研究方向为含风电接入的电力系统运行分析与控制;

陈昊(1980—), 男, 博士, 研究员级高工, 主要研究方向为新能源及接入技术、智能电网。

(编辑 姜新丽)