

# 基于潮流指纹的电网故障诊断算法研究

随着大电网的发展,电网规模越来越大,电网的故障造成的危害也在急剧放大。因此,需要在电网故障开始阶段能快速、准确地诊断出电网故障。针对电网的开关量故障信息存在误动作、拒动作等不确定性和电网数据存在错误概率,提出了基于电网潮流指纹的故障诊断算法。该算法选择有限数量节点为特征点,分析电网的潮流分布变化,检测出潮流的异常变化,从而诊断出电网故障。该算法对电网数据量要求少,算法抗干扰强,容错性高,可以有效地实现电网的故障诊断。

冯嘉顺 文 妙/海南电网有限责任公司三亚供电局

## 0 引言

随着电网技术的发展,大电网和区域联网得到长足发展,经济效益显著。但是当电网中出现故障时,故障的可能性范围很广,在大电网中故障源和故障位置判断难度更大。同时,故障造成的危害也被放大,可能会导致电网出现大规模的停电情况。

当电网出现较大面积停电故障时,研究证明,在故障刚刚开始发生时,电网故障主要是几个元件出现开断事件,此时电网故障元件数量很少。但是当元件出现开断事件时,电网中的继电保护器和断路器可能会发生拒动作、误动作,此时就会导致电网中发生开断事件的元件数量快速增加,最终出现大规模停电。如果在电网故障发生初期,可以快速地发现电网中出现开断事件的元件,并进行处理,将可以有效地降低电网故障危害<sup>[1]</sup>。因此,发展快速、准确的电网故障诊断算法,对维护电网的稳定、安全运行具有非常重要的意义。

目前常用的电网故障诊断方法,大

多都是基于电网的开关量信息,这些电网故障诊断算法虽然有一部分在实际中已经应用,但是却存在下列几个缺点:

1) 对电网的数据要求很高,既要求有较大的电网数据量,同时对数据准确性、完备性要求很高。

2) 算法容错性不佳。

3) 部分算法无法诊断、分析电网的全网运行状态。

4) 电网中不同的继电保护器和断路器的动作时间记录存在偏差,没有统一。

电网潮流指纹可以反映电网的潮流特性和电气量信息,电网潮流指纹与电网物理特性关联密切,需要的数据量小。基于PMU的电网广域测量系统,时间相应速度快,可以在毫秒级上实现对电网信息的同步测量<sup>[2]</sup>。因此,本文提出了基于PMU和电网潮流指纹的电网故障诊断算法,实现对电网故障的快速、准确判断。

## 1 电网潮流指纹

### 1.1 电网潮流指纹概念

电网的潮流指纹主要是用于表征电网潮流分布的变化,该概念最早由2005年于尔铿教授提出,当电网发生不同类型故障时,电网将表现出不同的网络拓扑结构,此时电网的潮流分布不同。于尔铿教授将这种因为某时刻电网故障造成的电网潮流分布变化与电网网络拓扑结构变化之间的关系,称为电网的潮流指纹<sup>[3]</sup>。图1为电网发生故障前后的电网潮流指纹。由图1可知,当电网故障发生



冯嘉顺/工程师

### 关键词/Keywords

潮流指纹 ·  
电网故障 ·  
故障诊断 ·  
电网潮流分布 ·

后, 电网具有不同的潮流分布, 而对应的电网潮流指纹也发生了变化, 电网的潮流指纹可以反映出其电网潮流分布的变化特性。

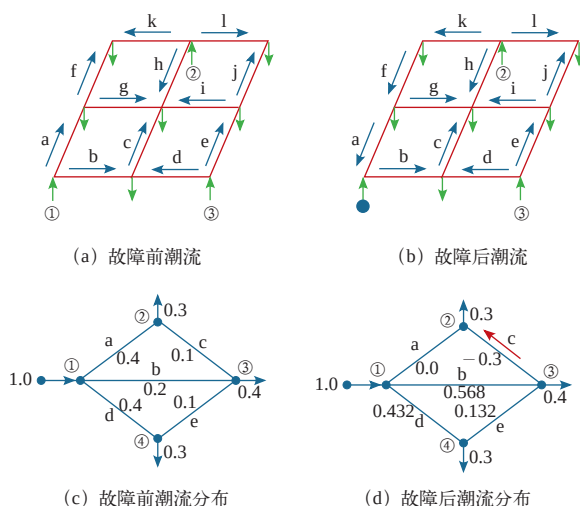


图1 电网故障前后潮流分布

## 1.2 电网潮流指纹特征点

电网的潮流指纹的特征点, 是指能够反映电网局部潮流分布特征的关键点位置。在实际的电网故障分析中, 由于电网规模庞大, 如果采集和分析电网所有节点和线路的信息, 将会导致数据量非常巨大, 而且成本高昂。因此, 选择电网中一些关键位置节点, 采集电网的潮流信息, 以体现出电网的整体的潮流特性。通过选择多个电网的特征点, 就可以较全面地覆盖整个电网的潮流信息。

鉴于电网中PMU的安置配置点的选择, 与电网的潮流特征点要求接近, 物理特性相符合, 因此, 选择电网中的PMU配置点为电网的潮流指纹特征点。电网的PMU配置点选择, 可以根据改进整体规划法确定<sup>[4]</sup>。

## 2 基于电网潮流指纹的故障诊断算法

### 2.1 电网潮流指纹特征提取

根据电网的潮流指纹和潮流指纹特征点的定义, 利用电网潮流指纹特征点失配度和潮流指纹匹配度两个特征值, 来设计电网的故障诊断算法。

但是随着大电网技术的发展, 电网的故障范围也随之扩大, 单个电网的潮流指纹特征点失配

度指标无法从更大的范围上来表征电网的故障信息。因此, 引入电网潮流指纹匹配度概念。

电网的潮流指纹匹配度越大, 则说明电网中支路发生故障的概率越大。电网的潮流指纹特征点失配度和潮流指纹匹配度, 这两个特征量可以很好地表征电网在不同范围、不同时刻和不同支路的特征点的故障信息。因此, 基于电网的潮流指纹特征点失配度和潮流指纹匹配度, 可以发展出电网的故障诊断算法。

### 2.2 电网故障诊断算法

根据电网的潮流指纹特征, 设计电网的故障诊断算法流程如图2所示, 算法步骤为:

- 1) 优化配置PMU, 设置潮流指纹的特征点为PMU配置点。
- 2) 根据电网的实际运行状态和电网要求, 设置电网潮流指纹匹配度的阈值。
- 3) 获取电网的网络参数和预设的电网故障集, 建立电网的潮流指纹故障数据库 (FFFD)。
- 4) 实时采集电网各支路、特征点处的电网潮流指纹, 将采集到的电网潮流指纹数据与FFFD中故障数据进行匹配计算, 若计算结果达到阈值, 则输出电网诊断结果。

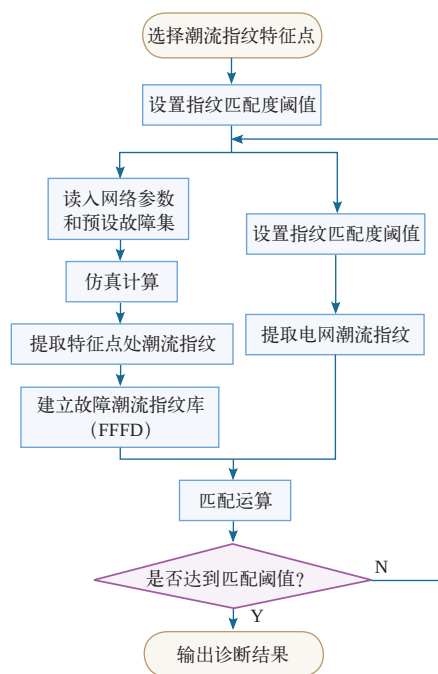


图2 基于潮流指纹的电网故障诊断算法流程

本文主要讨论如何设计电网故障诊断算法，限于文章篇幅，此处不讨论如何实现优化配置PMU，假定PMU已经采用整体规划法优化配置完成。

3 电网故障实例分析

本文应用IEEE 14节点系统为背景，进行了仿真分析，分析系统在故障时的电网潮流指纹特征，对电网的故障实现诊断。结果表明，基于潮流指纹的电网故障诊断算法，可以很好地对电网中出现的故障进行识别、判断。

3.1 IEEE 14节点系统

图3为IEEE 14节点系统的网络结构图。该系统包括5个发电机和14条母线。系统正常运行时，各线路参数参见文献[5]。为了采集该系统的潮流分布信息，需要先对系统进行PMU优化配置。本文应用改进整数规划法实现PMU的优化配置，计算结果表明节点2、6和9处分别安装设置PMU，见图3中黑色圆点，并将此3处节点作为潮流指纹特征点。

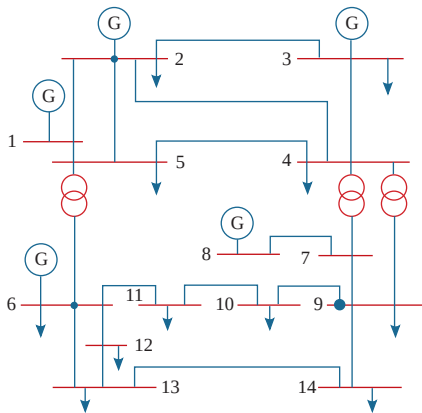


图3 IEEE 14节点系统结构图

本文将分别研究两种故障类型：①支路开路故障，研究当与特征点相联的支路出现开路故障时情况。②支路短路故障，研究当支路发生某点单相接地时故障情况。首先，读入IEEE 14节点系统的负荷、网络参数等数据，建立Matlab仿真计算模型，提取系统的潮流指纹特征点处的特征值，并建立该系统的预想故障集。然后，分别仿真上述两种故障发生时情况，建立故障潮流指纹库。

最后，分别仿真系统出现支路开路和支路短路故障时，采集系统的潮流分布数据，与故障潮流指纹库中数据进行匹配，分别得到不同系统故障时的系统潮流指纹匹配度，对系统故障进行诊断。根据多次仿真实验研究表明，设定电网潮流指纹匹配度阈值为 $E=10$ ，系统的各特征量的误差权重均为0.5%。

3.2 支路开路故障

假设支路L9-10出现开路故障，根据上述算法，计算得到系统故障潮流指纹失配度和潮流指纹匹配度。根据故障潮流指纹失配度计算公式，需要根据每个系统特征点信息，分别计算故障潮流指纹失配度。表1为以特征点6为例的故障潮流指纹失配度和基于全局故障信息的故障潮流指纹匹配度。

表1 支路L9-10开路故障时潮流指纹失配度和匹配度

| 支路编号 | 支路     | 故障失配度  | 故障匹配度   |
|------|--------|--------|---------|
| 1    | 无故障    | 7.153  | 0.954 2 |
| 2    | L1-2   | 28.22  | 0.365 4 |
| 3    | L1-5   | 11.08  | 0.587 2 |
| 4    | L2-3   | 49.53  | 0.189 3 |
| 5    | L2-4   | 20.01  | 0.515 2 |
| 6    | L2-5   | 32.74  | 0.347 8 |
| 7    | L3-4   | 33.89  | 0.338 9 |
| 8    | L4-5   | 6.844  | 0.981 2 |
| 9    | L4-7   | 10.57  | 0.609 8 |
| 10   | L5-6   | 6.982  | 0.973 9 |
| 11   | L6-11  | 10.83  | 0.598 5 |
| 12   | L6-12  | 19.49  | 0.538 8 |
| 13   | L6-12  | 11.70  | 0.583 2 |
| 14   | L6-13  | 13.58  | 0.563 3 |
| 15   | L7-8   | 27.18  | 0.347 5 |
| 16   | L7-9   | 10.85  | 0.596 3 |
| 17   | L9-10  | 0.0612 | 17.46   |
| 18   | L9-14  | 23.36  | 0.469 4 |
| 19   | L10-11 | 12.37  | 0.571 2 |
| 20   | L12-13 | 9.854  | 0.811 8 |
| 21   | L13-14 | 14.57  | 0.554 2 |

图4和图5分别为支路L9-10开路故障时，绘图表示表1中的潮流指纹失配度和匹配度。图4和图5中编号17表示支路L9-10，此时该支路的潮流指纹失配度与其他支路相比，明显差值较大，接

近于0,表示支路L9-10与预设故障情况类似。同时支路L9-10的潮流指纹匹配度明显大于其他支路。因此,实现了对系统的故障诊断。

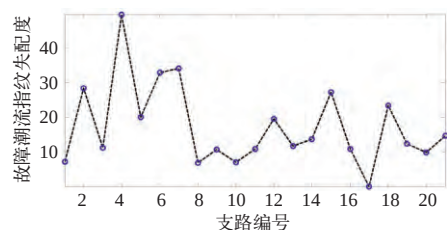


图4 支路L9-10开路故障时潮流指纹失配度

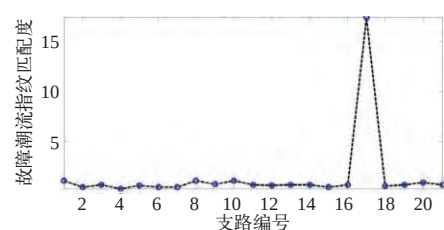


图5 支路L9-10开路故障时潮流指纹失配度

### 3.3 支路短路故障

假设支路L9-14出现短路故障,根据上述算法,计算得到系统故障潮流指纹失配度和潮流指纹匹配度。表2为以特征点6为例的故障潮流指纹失配度和基于全局故障信息的故障潮流指纹匹配度。

表2 支路L9-14短路故障时潮流指纹失配度和匹配度

| 支路编号 | 支路    | 故障失配度   | 故障匹配度   |
|------|-------|---------|---------|
| 1    | 无故障   | 7.153   | 0.954 2 |
| 2    | L1-2  | 27.24   | 0.331 8 |
| 3    | L1-5  | 10.13   | 0.638 5 |
| 4    | L2-3  | 48.54   | 0.204 5 |
| 5    | L2-4  | 18.68   | 0.541 5 |
| 6    | L2-5  | 30.74   | 0.356 7 |
| 7    | L3-4  | 31.37   | 0.351 1 |
| 8    | L4-5  | 5.749   | 1.005   |
| 9    | L4-7  | 9.583   | 0.834 2 |
| 10   | L5-6  | 6.192   | 0.995 3 |
| 11   | L6-11 | 9.362   | 0.849 2 |
| 12   | L6-12 | 17.90   | 0.566 7 |
| 13   | L6-12 | 9.148   | 0.866 4 |
| 14   | L6-13 | 12.78   | 0.574 9 |
| 15   | L7-8  | 25.27   | 0.372 2 |
| 16   | L7-9  | 8.612   | 0.889 7 |
| 17   | L9-10 | 0.584 2 | 10.61   |

(续)

| 支路编号 | 支路     | 故障失配度   | 故障匹配度   |
|------|--------|---------|---------|
| 18   | L9-14  | 0.673 9 | 14.42   |
| 19   | L10-11 | 10.38   | 0.615 2 |
| 20   | L12-13 | 7.978   | 0.898 9 |
| 21   | L13-14 | 13.25   | 0.567 4 |

图6和图7分别为支路L9-14短路故障时,绘图表示表2中的潮流指纹失配度和匹配度。图6和图7中编号18表示支路L9-14,此时该支路的潮流指纹失配度与其他支路相比,明显差值较大,接近于0,表示支路L9-14与预设故障情况类似,同时支路L9-14的潮流指纹匹配度明显大于其他支路。因此,实现了对系统的故障诊断。

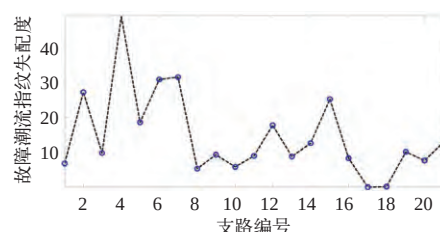


图6 支路L9-14短路故障时潮流指纹失配度

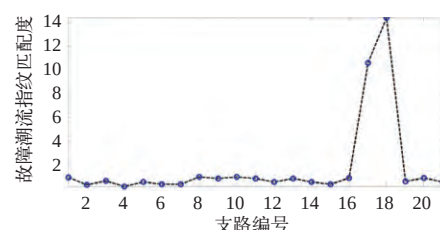


图7 支路L9-14短路故障时潮流指纹失配度

## 4 结束语

本文提出了基于电网潮流指纹信息的电网故障诊断算法,利用PMU采集电网的实时数据,根据选定的特征点,计算电网的潮流分布变化,从而确定电网的故障。该算法可以对整个电网进行实时的故障诊断,对电网的数据需求量小,抗干扰能力强。同时该算法,避免了开关或者保护电路存在的误动作、拒动作等不确定因素,相比于现有方法,可以更加有效地诊断出电网故障。通过IEEE 14节点系统仿真计算表明,该算法可以有效地诊断出电网的故障,应用前景很好。

参考文献

[1] 陈彬, 陈敏维, 庞清乐. 基于粗糙集理论的配电网故障风险评估[J]. 电气应用, 2015, 34 (5) : 136-140.

[2] 张雅, 杨丽徙, 刘冬, 等. 基于蚁群算法的配电网故障后恢复重构[J]. 电气应用, 2007, 26 (9) : 41-44.

[3] 刘延乐, 刘文颖, 林玉东, 等. 一种基于潮流指纹识别的电网故障实时诊断方法[J]. 现代电力, 2013, 30 (2) : 1-6.

[4] 郝艳妮. 基于信息融合技术的电网故障诊断研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.

[5] 赵伟. 基于广域测量系统的电网故障诊断方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.

(收稿日期: 2015-05-14) EA

(上接第32页)

3) 所有快速出口滑行道指示灯应设置单灯监控装置, 当一组灯具中有一套灯具出现故障时, 要求关闭该组中的其他灯具。

2.6 灯光站内供配电系统的保障措施

根据规范要求, 助航灯光系统的两路供电的切换时间如下表所示。

表 应急电源的要求

| 跑道            | 需要供电的助航灯光设备     | 最大转换时间/s |
|---------------|-----------------|----------|
| 非精密进近跑道       | 进近灯光系统          | 15       |
|               | 目视进近坡度指示系统      | 15       |
|               | 跑道边灯            | 15       |
|               | 跑道入口灯           | 15       |
|               | 跑道末端灯           | 15       |
|               | 障碍灯             | 15       |
| I类精密进近跑道      | 进近灯光系统          | 15       |
|               | 目视进近坡度指示系统      | 15       |
|               | 跑道边灯            | 15       |
|               | 跑道入口灯           | 15       |
|               | 跑道末端灯           | 15       |
|               | 跑道中线灯           | 15       |
|               | 障碍灯             | 15       |
|               | 必要的滑行道灯         | 15       |
| II/III类精密进近跑道 | 进近灯光系统近端300 m部分 | 1        |
|               | 进近灯光系统其余部分      | 15       |
|               | 跑道边灯            | 15       |
|               | 跑道入口灯           | 1        |
|               | 跑道末端灯           | 1        |
|               | 跑道中线灯           | 1        |
|               | 接地带灯            | 1        |
|               | 全部停止排灯          | 1        |
|               | 必要的滑行道灯         | 15       |
|               | 障碍灯             | 15       |
|               |                 |          |

为了保证助航灯光系统的供电可靠性, 在灯光变电站内, 要求有两路市电, 1部柴油发电机作为应急电源。柴油发电机自动起动, 并自动投入运行, 起动至满载时间不大于12 s, 以满足在I类运行时, 最大转换时间不大于15 s的要求。如果要实施II/III类灯光系统的运行, 还必须在灯光变电站内进行改造, 在进近灯光系统近端300 m部分、跑道入口灯、跑道末端灯、跑道中线灯、接地带灯和停止排灯的灯光回路前端设置不间断电源系统, 以保证其供电切换时间小于1 s。

3 结束语

2012年7月, 国务院出台了《国务院关于促进民航业发展的若干意见》, 为了贯彻落实《意见》精神, 提高低能见度天气条件下的航班运行效率, 减少航班延误, 提升民航运输服务品质, 2013年3月, 民航局下发了《关于组织开展大中型机场II、III类运行项目方案论证工作的通知》, 拟在大中型机场实施II/III类运行项目。对1 000万~2 000万人次机场实施原则是: 按照至少1条跑道主降方向III类配置、近期II类运行, 双跑道的机场另一条跑道的一端满II类起飞使用。

II/III类运行的建设, 将极大地改善机场的飞行条件, 保证飞行安全, 减少航空公司因天气原因使航班延误或改备降其他机场所带来的经济损失, 从而提高航班的准点率、机场的利用率, 也能够提升对旅客的服务质量和民航的整体社会形象。II/III类运行目前已在国内各大中型机场中逐步改造、实施和推广。

(收稿日期: 2015-06-15) EA