

基于多任务异步处理的电网脆弱线路在线辨识

白懿鹏¹, 吕飞鹏¹, 廖小君², 李春海¹

(1. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065;

2. 国网四川省电力公司技能培训中心, 四川 成都 610072)

摘要: 提出一种利用多任务异步处理模式进行电网脆弱线路快速辨识的方法。综合考虑线路保护配合关联度和综合后果严重度, 定义了保护脆弱度; 综合考虑电网的拓扑结构和系统运行方式, 利用潮流介数对线路结构脆弱性进行评估; 由此给出了结合线路保护脆弱度与潮流介数的线路脆弱度指标, 并采用多任务异步处理模式将指标计算工作分为多个任务模块并发处理。算例结果表明: 所提方法对电网中的脆弱线路有较好的辨识能力及较高的辨识精度, 能够有效缩短辨识所需的时间, 适合在线应用。

关键词: 电力系统; 多任务; 异步处理; 脆弱线路; 脆弱性; 在线辨识; 保护脆弱度; 潮流介数

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.03.017

0 引言

近年来, 世界范围内发生了多起电力系统大停电事故, 造成了巨大的经济损失与严重的社会影响^[1-2]。研究历次大停电事故表明, 大停电事故一般是由电网中少数元件故障导致其他元件发生连锁故障从而退出运行所造成的, 少数线路的重载运行与保护装置的不正确动作是连锁故障发生的主要诱因^[3-4]。随着电网规模的逐步扩大, 其对电力系统的在线安全分析能力提出了更高要求, 因此, 在当前系统的运行方式下快速准确地辨识出电网中的薄弱环节, 尤其是连锁故障发生初期的少数脆弱线路, 对有效实施相应紧急控制策略、预防系统大面积停电有着极其重要的意义。

脆弱线路辨识方法依据建立连锁故障模型的不同, 主要分为基于复杂网络拓扑及其改进模型的结构分析法^[5-8]、基于事故链模型的脆弱环节评估法^[9-10]与基于协同效应的脆弱线路识别^[11-12]。文献^[5]结合小世界网络特性的形成机理, 依据复杂网络理论中的度分布、线路介数及最大连通域等指标对电网进行了拓扑结构的建模, 提出了带权重的线路介数指标, 并以此作为脆弱线路辨识的基础。文献^[6]提出电气介数的概念, 采用单位注入电流法计算线路介数, 使介数指标更能反映实际电网的结构特性。文献^[7-8]提出了潮流介数作为线路重要性的评估指标, 其满足基尔霍夫定律且考虑了线路潮流的方向性, 物理背景较符合电力系统的实际情况。文献^[9-10]引入了基于事故链的电网脆弱度评估模型, 该模型以风险概率为基础, 综合考虑了电网的实际运行方式及各类故障因素对环节脆弱度的影响, 并以此识别关键线路。文献^[11-12]利用协同效应理论从多个角度对脆弱线路进行评估和识别。上述方法均未计及保

护故障因素对电网安全的影响, 针对这一问题, 文献^[13]建立了保护误动与拒动模型, 定义了保护脆弱度指标, 在此基础上提出了单元保护脆弱强度的概念, 并将其作为权值引入网络加权拓扑模型, 结合介数指标给出了电网脆弱线路与节点的辨识方法。以上辨识方法从不同角度将实际电气特征和电网的各类影响因素融入脆弱性模型中, 但对方法的计算效率考虑较少, 当电网规模较大时, 上述方法可能存在计算耗时较长的问题, 因而不能较好满足系统的实时性需求。

异步处理是解决数据量大、耗时长且计算复杂的问题的重要途径。目前, 已有研究主要集中在将并行计算应用于系统的潮流及短路计算等方面, 且表明异步处理模式有效地提高了算法的计算效率^[14-16]。基于此, 本文提出基于多任务异步处理的电网脆弱线路在线辨识方法。首先, 构建保护装置的不正确动作模型, 考虑电压及功率波动后果严重度定义保护脆弱度指标; 然后, 利用潮流介数对线路的结构脆弱性进行评估, 并结合线路两端保护脆弱度定义线路脆弱度指标; 最后, 采用多任务异步处理模式将复杂的计算模块封装为任务相互独立或嵌套的并发执行, 从程序处理的角度有效提高算法的效率, 以满足系统的在线需求。IEEE 39 节点系统的仿真分析验证了本文方法的合理性与有效性。

1 多任务异步处理技术

1.1 异步处理技术概述

异步处理技术是近年来计算机领域应用较多的关键技术之一。与传统同步处理技术相对应, 异步处理技术是指当前执行的请求不会阻塞其调用者的线程, 线程可继续朝下执行, 使 CPU 可同时响应多个请求的处理技术。换言之, 异步处理能使调用方法的主线程不需要同步等待另一线程的完成, 从而

可让主线程继续响应其他请求。

异步处理的本质是充分利用每个 CPU 核的处理资源,将耗时操作配置到不同线程上同时执行,从而缩短操作执行的总时间。可见,异步处理的实现依赖于多线程处理技术,并在此基础上进行了功能的扩展与改进。

1.2 多任务的运作模式

为了进一步提高异步处理的效率及简化编程模式,在 .NET Framework 4.0 中提出了任务(Task)及任务并行库(TPL)的概念。任务表示通过委托形式将待完成的某项工作封装后的运行模块。任务并行库则是 .NET 框架中用于任务状态管理、线程调度及处理工作分区的一组公共类型和应用程序编程接口(API)^[17]。任务的功能类似于线程或线程池中的工作项,但其抽象级别更高。任务执行时类似于线程中的 workflow,因此线程是任务执行的载体,但任务和线程之间没有一对一的严格限制关系,一个线程上可以执行一个或多个任务,各任务执行的时间长度也可以不同,线程中各任务的基本执行模式见图 1。

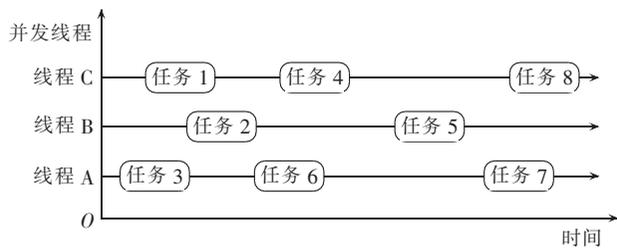


图 1 任务的基本执行模式
Fig.1 Basic mode of task execution

异步模式下,.NET 框架通过任务并行库自动创建必要的线程支持任务执行的需求,并由其中的任务调度器(Task Scheduler)完成线程中任务的分配执行,当一个工作线程内部有多个任务正在等待,而某些工作线程却保持空闲时,任务调度器会自动让空闲的工作线程进入忙碌线程的局部队列中提取一个等待的任务,并执行该任务。

1.3 多任务异步处理流程

异步处理模式可以看作由诸多异步操作单元构成,而一个任务可表示任意异步操作单元,即将异步处理方法细分为多个任务,通过安排任务与任务之间的执行关系,如任务相互独立执行或父类任务与子任务的相互套执行等,简单高效地实现程序的异步处理功能。因此,任务为异步处理工作提供了非常大的灵活性。基于多任务的异步处理具体流程见图 2。

多任务的异步处理模式实质上优化了 CPU 及线程的资源配置,通过任务并行库使任务依赖线程的自动支持及合理分配,大幅提升线程处理资源的利用率,从而提高程序执行效率,缩短计算处理时间。

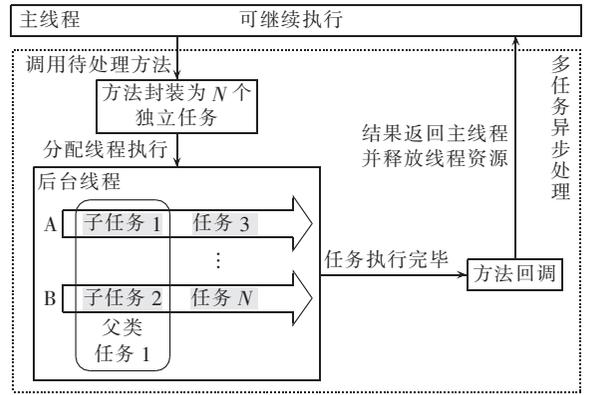


图 2 多任务异步处理流程

Fig.2 Flowchart of multi-task asynchronous processing

相较于传统同步处理模式,多任务异步处理技术在快速解决电网中各类大型且复杂的问题方面具有明显优势。

2 电网线路脆弱性指标

2.1 保护脆弱度

电网中保护装置的脆弱性主要体现在其不正确动作后对电网其他线路节点造成的严重影响。当线路 $i-j$ 发生故障被切除后,与其相邻的线路保护装置不正确动作的概率将大幅提高,而一个保护装置拒动或误动,则会引起其他关联保护连续动作,造成连锁故障的发生^[18]。

保护装置间的不正确动作关联方式的数量与电网规模成正比。考虑到实际计算量的限制,并鉴于保护装置正确动作的概率较高、不同保护装置同时故障的概率较低的现状^[19],本文基于主/远后备保护的配合关系^[20]及保护装置常见的不正确动作情况^[21],建立了如图 3 所示的线路保护间不正确动作的关联模型。



图 3 保护间不正确动作的关联模型

Fig.3 Model of incorrect action correlation among protections

图 3 描述了线路 $i-j$ 的主保护与其上下游线路远后备保护间的关联动作模型,需要说明的是,该模型只针对输电网线路两侧均配置保护的情况,且考虑到实际系统中发电机端线路保护配置较高,假定发电机出口的保护 100% 可靠^[21]。本文旨在快速找出保护系统的脆弱环节,即需在短时间内计算各线路保护脆弱度的相对大小,因此,利用上述简化的保护

关联模型进行脆弱度计算是合理且可行的。

主/远后备保护间的配合关系是相对固定且易于确定的,其反映了保护的固有静态特性。因此,基于保护配合后备依赖度^[20]定义保护 k 的配合关联度,如式(1)所示。

$$\beta_k = \rho_{BD}(k) \quad (1)$$

其中, $\rho_{BD}(k)$ 为保护 k 的远后备保护的数目。

保护配合关联度在一定程度上反映了保护的静态结构脆弱性。保护 k 的关联度越大,表明越多保护依赖于保护 k ,其所处位置的电气耦合越紧密。

保护 k 及其关联保护连锁动作后,将对系统运行状态产生影响^[22],为了反映其影响程度,定义保护关联连锁动作后节点电压及线路潮流后果严重度函数分别如式(2)、(3)所示。

$$R_{iV}(j) = \begin{cases} U_i - 1.05 & U_i > 1.05 \\ 0 & 0.95 \leq U_i \leq 1.05 \\ 0.95 - U_i & U_i < 0.95 \end{cases} \quad (2)$$

$$R_{iF}(j) = \begin{cases} \frac{S'(i) - S(i)}{S(i)} & S'(i) > S(i) \\ 0 & S'(i) \leq S(i) \end{cases} \quad (3)$$

其中, $R_{iV}(j)$ 为节点 i 在保护关联连锁 j 动作后的电压后果严重度; U_i 为保护关联动作后节点 i 的电压标么值; $R_{iF}(j)$ 为线路 i 在保护关联连锁 j 动作后的潮流波动后果严重度; $S'(i)$ 为保护关联连锁 j 动作后线路 i 的视在功率; $S(i)$ 为正常运行时线路 i 的视在功率。

结合保护间不正确动作的关联模型及上述两方面对系统的影响,定义保护 k 不正确动作的综合后果严重度为:

$$\lambda_k = \sum_{j \in K} \left[\sum_{i=1}^N R_{iV}(j) + \sum_{l=1}^M R_{lF}(j) \right] \quad (4)$$

其中, K 为包含保护 k 误动和拒动的保护关联连锁集合; N 为系统节点个数; M 为系统线路数目。

保护综合后果严重度量化了保护不正确动作对系统造成的影响程度,在一定程度上表征了保护装置的状态脆弱性。

综合考虑保护配合关联度和保护综合后果严重度,定义保护 k 的脆弱度为:

$$V_k = N(\beta_k) + N(\lambda_k) \quad (5)$$

其中, $N(\cdot)$ 为消除指标量纲不同影响的归一化函数^[23]。

2.2 潮流介数

复杂网络理论中的线路介数是基于假设母线间功率只沿最短路径流动模型提出的,忽略了电网的功率传输需要满足基尔霍夫定律的事实,不符合电力系统的实际运行情况,具有一定的局限性。因此,本文利用文献[7]的潮流介数来衡量线路的结构脆弱性。

基于单一发电机-负荷对 (G_m, L_n) 的线路潮流介数指标定义为:

$$F_{Bij,mn} = \min(S_m, S_n) \frac{P_{ij}(m, n)}{P(m, n)} \quad (6)$$

其中, $\min(S_m, S_n)$ 为该发电机-负荷对 (G_m, L_n) 的权重,取发电机节点 m 的实际出力与负荷节点 n 的实际负荷中的较小值,表示发电机-负荷对 (G_m, L_n) 间的最大可用传输功率; $P(m, n)$ 为发电机节点 m 到负荷节点 n 传输的有功功率; $P_{ij}(m, n)$ 为 $P(m, n)$ 在线路 $i-j$ 上的分量,如式(7)所示。

$$P_{ij}(m, n) = \frac{P_{ij,m} P_{ij,n}}{P_{ij}} \quad (7)$$

其中, P_{ij} 为线路 $i-j$ 上传输的有功功率; $P_{ij,m}$ 为线路 $i-j$ 潮流中来源于发电机节点 m 的分量; $P_{ij,n}$ 为线路 $i-j$ 潮流中流向负荷节点 n 的分量。

采用潮流追踪^[24]的方法,即通过顺流和逆流追踪计算可求得线路 $i-j$ 潮流中的功率组成。

由于每条线路可能被不同发电机-负荷对的传输路径经过,考虑线路被路径经过的次数以及电网中所有发电机-负荷对的累加效应,定义线路的潮流介数为:

$$F_{Bij} = \sum_{m \in G} \sum_{n \in L} F_{Bij,mn} \quad (8)$$

其中, G 为发电机节点集合; L 为负荷节点集合。

线路的潮流介数综合考虑了电网的拓扑结构和系统运行方式,真实反映了全网所有发电机-负荷对间的功率传输在各线路上的分配情况,量化了线路对全网功率传输的贡献程度,也在一定程度上表征了线路的结构脆弱性。

2.3 线路脆弱度指标

考虑到线路保护的不正确动作与线路承担的功率传输量对线路脆弱性的影响不是相互独立而是共同作用的,定义线路脆弱度指标为:

$$C(i, j) = \frac{1}{2} (V_k + V_{k+1}) F_{Bij} \quad (9)$$

其中, V_k 和 V_{k+1} 为线路 $i-j$ 两端保护的脆弱度; F_{Bij} 为线路 $i-j$ 的潮流介数。

由于潮流介数的大小反映了线路对电能的承载能力及其在功率传输方面的活跃程度,因而从式(9)可看出,潮流介数能对“活跃”线路的保护脆弱性进行有效放大,即具有相同保护脆弱度的线路,其中较活跃者更脆弱,故障后的影响更为严重。因此,线路脆弱度指标在有效量化保护因素对线路脆弱性的影响的基础上,计及电网结构及运行方式的影响,提高了脆弱线路的辨识精度。

3 脆弱线路异步化辨识

脆弱线路辨识方法可看作由保护脆弱度计算模块与潮流介数计算模块组合而成,两者间没有依赖关系,可独立执行,且两模块内部也由诸多独立的计

算功能构成。因此,依照多任务异步处理模式,可将辨识方法中各相对独立的计算模块封装为任务,由任务并行库统一安排,并发执行,实现电网脆弱线路辨识方法的异步化。其程序化实现的具体步骤如下。

(1)主线程异步调用脆弱线路辨识主功能函数,将其封装为 2 个父类任务,分别交由后台线程并发执行。

(2)父类任务 1 完成保护脆弱度计算功能,其中嵌套 a 个完整封装单个保护后果严重度计算功能的子任务。子任务均完成后,进行方法回调,由父类任务 1 对子任务返回结果进行处理,得到保护编号与其脆弱度对应的保护脆弱度指标集。

(3)父类任务 2 完成潮流介数计算功能,其中任务执行模式与步骤(2)类似,得到线路编号与其介数相对应的线路潮流介数指标集。

(4)父类任务完成后,进行方法回调,由主功能函数对 2 个指标集的数据进行处理,得到全网线路脆弱度指标,并将其按降序进行排序,以便快速找到脆弱线路。

需要说明的是,2 个父类任务相互独立,可同时执行,同一父类任务中的子任务间也可由任务调度器进行合理的线程分配执行,但父类任务的完成依赖于其中子任务的回调,因此,嵌套任务中存在同步执行模式。

脆弱线路异步化辨识的具体流程如图 4 所示。

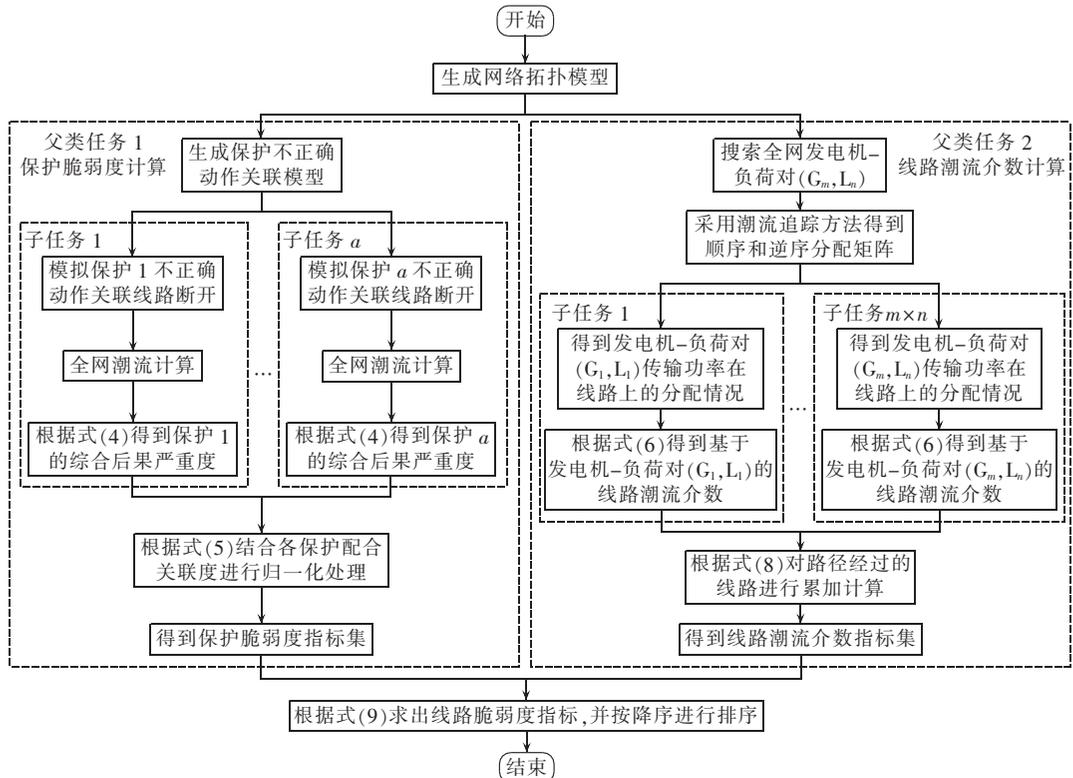


图 4 脆弱线路辨识的异步化流程

Fig.4 Asynchronous processing flowchart of vulnerable line identification

4 算例分析

本文采用基于 .NET Framework 4.5 的 C# 语言编写脆弱线路在线辨识程序,其中调用 PSD-BPA 实现程序的潮流计算功能,通过以本文所提辨识方法为基础的后台代码对数据进行运算处理,实现电网脆弱线路辨识功能。

以 IEEE 39 节点系统为例,该系统共有 10 台发电机、19 个负荷、46 条支路和 92 个线路保护,其拓扑结构如图 5 所示。使用程序对该算例系统进行脆弱线路辨识,得到保护、线路脆弱度计算结果分别如表 1、2 所示。由于篇幅所限,只列出脆弱度排名前 15 位的保护及线路。

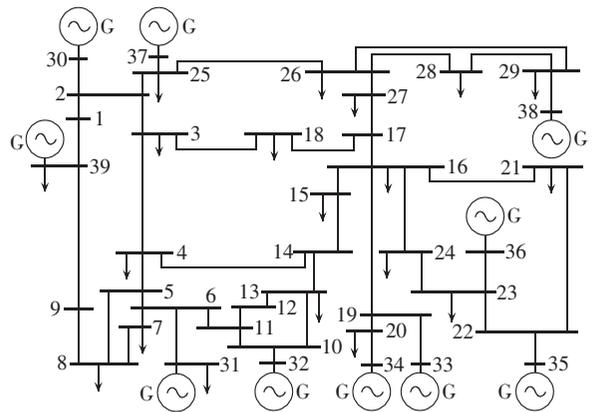


图 5 IEEE 39 节点系统接线图

Fig.5 Wiring diagram of IEEE 39-bus system

表 1 保护脆弱度计算结果

Table 1 Calculative protection vulnerabilities

| 保护位置 | 配合 关联度 | 综合后果 严重度 | 脆弱度 |
|---------------------|-----------|-------------|-------|
| 线路 15-16(节点 16 侧保护) | 4 | 157.667 | 2.000 |
| 线路 16-21(节点 16 侧保护) | 4 | 156.708 | 1.994 |
| 线路 16-19(节点 16 侧保护) | 4 | 128.107 | 1.812 |
| 线路 16-17(节点 16 侧保护) | 4 | 108.395 | 1.686 |
| 线路 16-24(节点 16 侧保护) | 4 | 105.437 | 1.667 |
| 线路 2-3(节点 2 侧保护) | 3 | 133.545 | 1.596 |
| 线路 38-29(节点 29 侧保护) | 2 | 157.381 | 1.498 |
| 线路 6-7(节点 6 侧保护) | 3 | 115.908 | 1.484 |
| 线路 2-25(节点 2 侧保护) | 3 | 111.732 | 1.458 |
| 线路 1-2(节点 2 侧保护) | 3 | 109.695 | 1.445 |
| 线路 5-6(节点 6 侧保护) | 3 | 109.513 | 1.443 |
| 线路 26-27(节点 26 侧保护) | 3 | 92.570 | 1.336 |
| 线路 26-29(节点 26 侧保护) | 2 | 126.068 | 1.299 |
| 线路 31-6(节点 6 侧保护) | 3 | 85.162 | 1.288 |
| 线路 28-29(节点 29 侧保护) | 2 | 120.218 | 1.262 |

表 2 线路脆弱度计算结果

Table 2 Calculative line vulnerabilities

| 线路 | 潮流介数 | 潮流介数排序 | 线路脆弱度 |
|-------|----------|--------|----------|
| 16-19 | 3142.024 | 2 | 4169.492 |
| 16-21 | 2294.729 | 7 | 2934.684 |
| 2-3 | 2182.856 | 8 | 2897.329 |
| 17-18 | 3540.871 | 1 | 1783.499 |
| 21-22 | 2171.987 | 9 | 1725.308 |
| 16-17 | 1435.598 | 15 | 1722.160 |
| 35-22 | 2762.985 | 3 | 1615.025 |
| 2-25 | 1399.159 | 16 | 1612.624 |
| 36-23 | 2497.158 | 6 | 1487.665 |
| 15-16 | 1147.986 | 20 | 1389.191 |
| 1-2 | 1566.744 | 13 | 1358.444 |
| 37-25 | 2590.706 | 4 | 1317.731 |
| 5-6 | 1248.748 | 19 | 1303.602 |
| 4-14 | 1702.597 | 11 | 1298.526 |
| 33-19 | 2579.483 | 5 | 1240.381 |

由表 1、2 可以得出以下结论。

(1) 脆弱度较高的保护所在节点度数较大,如节点 16 具有全网最高节点度数 5,节点 2 的度数为 4,这与基于节点介数的结构脆弱度辨识结果一致,且在此基础上,结合故障后果严重度对处于同一节点的不同保护的脆弱性进行了有效区分。

(2) 脆弱度较高的线路主要为系统的重要联络线路(发电机节点出线处以及重负荷节点所在线路),这些线路承担了较重的功率传输及承载任务,具有较高的结构重要性,一旦这些线路上的保护发生不正确动作造成线路退出运行,将严重影响电网的安全运行。因此,本文所提方法在保持对结构脆弱性辨识的基础上,增加了对保护不正确动作因素的考虑,能更为全面有效地识别影响系统安全运行的脆弱线路。

为验证本文方法的合理性与有效性,选取脆弱度排在前 10 位的线路与已有模型^[13,25]所得结果进行

对比,如表 3 所示。

表 3 脆弱线路辨识结果对比

Table 3 Comparison of vulnerable line identification results

| 排序 | 脆弱线路 | | |
|----|----------|----------|-------|
| | 文献[13]方法 | 文献[25]方法 | 本文方法 |
| 1 | 2-3 | 16-17 | 16-19 |
| 2 | 16-19 | 2-3 | 16-21 |
| 3 | 16-17 | 14-15 | 2-3 |
| 4 | 15-16 | 15-16 | 17-18 |
| 5 | 4-14 | 16-19 | 21-22 |
| 6 | 2-25 | 4-14 | 16-17 |
| 7 | 5-6 | 4-5 | 35-22 |
| 8 | 3-4 | 17-27 | 2-25 |
| 9 | 16-21 | 3-4 | 36-23 |
| 10 | 26-29 | 3-18 | 15-16 |

由表 3 可发现,本文方法所得排序结果与文献[13]及文献[25]方法所得结果具有一定相似性,均能够有效辨识出线路 16-19、2-3 和 16-17 等系统重要联络线路为脆弱线路。由于 3 种方法对脆弱线路评估的角度不同,排序结果仍存在差异,如线路 17-18、21-22、35-22 和 36-23 均未出现在文献[13]、[25]方法所得结果排序的前 10 位中,但由表 2 计算结果可知,这些线路的潮流介数排序较高,特别是线路 17-18 的潮流介数指标排序第一,表明其承担的功率传输任务十分重要,故障后对电网的功率平衡及潮流分布有较大影响。而线路 35-22 和 36-23 作为发电机出口母线,承担系统中多个节点的功率输送任务,一旦其退出运行,将导致系统功率严重缺额,影响系统稳定。因此,从线路承担的功率输送作用和系统拓扑结构角度分析,上述线路在电网中的地位较为重要,也应属于脆弱线路,本文方法得出了这样的结果。

对于脆弱线路 16-19 和 2-3 的排序,文献[13]和文献[25]方法得到的结果均是线路 2-3 的脆弱性大于线路 16-19,而本文方法得到的排序结果恰恰相反,这主要是由于文献[25]忽略了线路 16-19 上的保护脆弱度对其脆弱性的影响,而文献[13]采用基于最短路径的加权方式,忽略了系统功率传输遵循基尔霍夫定律的事实,在考虑潮流分布对线路脆弱性的影响方面略有不足。一方面,线路 2-3 与线路 1-2、25-26 共同作为节点 30、37 所在发电机的功率外送通道,其功率传输的作用有限,而线路 16-19 作为节点 33、34 所在发电机功率外送的唯一通道,且节点 16 接有大量重负荷线路,为满足系统功率平衡,线路 16-19 需承担大量的功率传输任务,计算结果表明,系统正常运行时,线路 16-19 上传输的有功功率是线路 2-3 上传输有功功率的 1.25 倍。同时,线路潮流介数指标的排序结果也表明线路 16-19 较线路 2-3 在系统功率传输过程中的作用更为重要。另一方面,线路 16-19 上的保护一旦发生不正确动作,将

直接孤立节点 33、34 所在发电机,使之功率无法外送,造成电网解列,引起系统潮流大范围波动,严重影响系统的安全稳定运行。从上述 2 个方面来看,线路 2-3 的脆弱性都应小于线路 16-19。

从以上分析中可看出,相对于文献[13]和[25]的方法,本文方法考虑的因素更为全面,也更加符合电网运行的实际情况,所得的脆弱线路辨识结果更具有合理性。

为了分析比较本文处理模式的计算效率,分别采用传统顺序串行处理模式和多任务异步化处理模式对多个 IEEE 标准算例系统进行脆弱线路辨识,其处理时间对比如表 4 所示。

表 4 2 种处理模式耗时对比
Table 4 Comparison of time-consumption between two processing modes

| 算例系统 | 保护脆弱度计算耗时/s | | 总耗时/s | |
|----------|-------------|-----------|----------|-----------|
| | 顺序串行处理模式 | 多任务异步处理模式 | 顺序串行处理模式 | 多任务异步处理模式 |
| IEEE 39 | 9.972 | 6.583 | 10.112 | 6.681 |
| IEEE 57 | 19.028 | 12.489 | 19.291 | 12.519 |
| IEEE 300 | 214.467 | 129.181 | 299.810 | 194.088 |

算法程序统一采用 C# 语言编写,利用 .NET 中精度较高的 System.Diagnostics.Stopwatch 类型进行时间测试,且算法程序统一安排 4 核 3.7 GHz 的计算机上运行。由表 4 中计算耗时结果可见,保护脆弱度计算模块耗时相对较长,这是因为该模块需多次进行全网潮流计算以获取保护不正确动作后电网的各项运行指标,经程序调试测得调用 PSD-BPA 进行一次潮流计算所需要的平均时间为 0.104 s,且其调用次数与系统保护配置数量成正比。传统顺序串行处理模式下,程序按顺序对每种保护不正确动作情况逐次进行脆弱度计算,而多任务异步处理模式则通过并发执行同时进行多种情况下的脆弱度计算,大幅缩短计算时间。在整体计算方面,多任务异步处理模式利用保护脆弱度计算模块和潮流系数计算模块之间的相互独立性,充分利用 CPU 资源,将两者分配至不同线程并发计算,大幅提高了计算效率,相较传统的顺序串行处理模式,缩短了约 35% 的整体计算时间。

在实际应用中,系统实时数据的传输与存储过程耗时均在几十毫秒内,脆弱度计算时间根据电网规模不同在几十秒至几分钟内。脆弱线路辨识旨在对系统薄弱输电环节进行动态监测和分析,以进行快速的安全稳定控制^[26],利用多任务异步模式处理实时数据,可大幅提高计算效率,能更好地满足在线辨识的实时性要求,可望用于实际系统的脆弱线路在线辨识。

5 结论

本文从程序处理模式的角度研究了电网脆弱线路的辨识方法,针对传统方法计算速度慢、效率较低的不足,提出了基于多任务的异步处理模式,将耗时长久的计算模块封装为独立任务并发执行,以此缩短整体计算时间,并在此基础上结合保护脆弱度和潮流系数给出了一种电网脆弱线路辨识的新方法。该方法计及了线路保护脆弱度对线路脆弱性的影响,并考虑了线路在实际电网功率传输过程中的重要程度,使辨识结果更加符合电网实际运行情况,同时,通过多任务的异步处理模式将各计算模块有机地组合,大幅提高了方法的运算速度,为电网的脆弱线路在线辨识提供了一种新思路。最后,算例结果验证了本文辨识方法的有效性,并表明该方法具有一定的在线应用前景。

参考文献:

- [1] 李春艳,陈洲,肖孟金,等. 西欧“11.4”大停电分析及对华中电网的启示[J]. 高电压技术,2008,34(1):163-167.
LI Chunyan, CHEN Zhou, XIAO Mengjin, et al. Analysis of large scale blackout in Western Europe Power Grid on November 4 and relevant suggestion to Central China Power Grid[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(1): 163-167.
- [2] 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 Indian Power Grid on July 30 and 31, 2012[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 167-174.
- [3] DAVID C, ELIZONDO J, REE D L. Analysis of hidden failures of protection schemes in large interconnected power systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 956-964.
- [4] KINNEY R, CRUCITTI P, ALBERT R, et al. Modeling cascading failures in the North American Power Grid[J]. European Physical Journal B: Condensed Matter, 2005, 46(1): 101-107.
- [5] 曹一家,陈晓刚,孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路辨识[J]. 电力自动化设备,2006,26(12):1-5,31.
CAO Yijia, CHEN Xiaogang, SUN Ke. Identification of vulnerable lines in power grid based on complex network theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(12): 1-5, 31.
- [6] 徐林,王秀丽,王锡凡. 电气介数及其在电力系统关键线路识别中的应用[J]. 中国电机工程学报,2010,30(1):33-39.
XU Lin, WANG Xiuli, WANG Xifan. Electric betweenness and its application in vulnerable line identification in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 33-39.
- [7] 刘文颖,梁才,徐鹏,等. 基于潮流系数的电力系统关键线路辨识[J]. 中国电机工程学报,2013,33(31):90-98.
LIU Wenyong, LIANG Cai, XU Peng, et al. Identification of critical line in power systems based on flow betweenness[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 90-98.
- [8] 梁才,刘文颖,但扬清,等. 输电线路的潮流系数及其在关键线路识别中的应用[J]. 电力系统自动化,2014,38(8):35-40.
LIANG Cai, LIU Wenyong, DAN Yangqing, et al. Flow betweenness of transmission lines and its application in critical line identification

- fication[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(8):35-40.
- [9] WANG A,LUO Y,TU G,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.
- [10] 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.
- [11] 李扬,苏慧玲. $N-k$ 故障下影响电力系统脆弱性的关键线路研究[J]. 电力自动化设备,2015,35(3):60-67.
LI Yang,SU Huiling. Critical line affecting power system vulnerability under $N-k$ contingency condition[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(3):60-67.
- [12] 刘利民,刘俊勇,魏震波,等. 基于协同效应分析的输电线路脆弱评估方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(5):30-37.
LIU Limin,LIU Junyong,WEI Zhenbo,et al. Transmission line vulnerability assessment based on synergetic effect analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(5):30-37.
- [13] 张海翔,吕飞鹏. 基于保护脆弱度加权拓扑模型下的电网脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报,2014,34(4):613-619.
ZHANG Haixiang,LÜ Feipeng. The vulnerability evaluation model of power grid based on the protection-vulnerability-weighted topological model[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(4):613-619.
- [14] 李传栋,房大中,杨金刚,等. 大规模电网并行潮流算法[J]. 电网技术,2008,32(7):34-39.
LI Chuandong,FANG Dazhong,YANG Jingang,et al. New research on parallel power-flow calculation for large-scale power system[J]. Power System Technology,2008,32(7):34-39.
- [15] 熊玮,夏文龙,余晓鸿,等. 多核并行计算技术在电力系统短路计算中的应用[J]. 电力系统自动化,2011,35(8):49-52.
XIONG Wei,XIA Wenlong,YU Xiaohong,et al. Multi-core parallel computation technique for power system short-circuit faults analysis[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(8):49-52.
- [16] 朱杰,伍永刚,陈建国,等. 多任务的异步并发在梯级 AGC 系统中的实现[J]. 计算机工程与设计,2005,26(9):2416-2419.
ZHU Jie,WU Yonggang,CHEN Jianguo,et al. Research on multi-task of asynchronism and concurrency in cascade AGC system[J]. Computer Engineering and Design,2005,26(9):2416-2419.
- [17] NAGEL C,EVJEN B,GLYNN J. Professional C# 4 and .NET 4[M]. New York,USA:Wiley Publishing Inc.,2010:517-539.
- [18] TAMRONGLAK S,PHADKE A G,HOROWITZ S H,et al. Anatomy of power system blackouts:preventive relaying strategies [C]//Proceedings of the IEEE/PES Winter Meeting. New York, USA:IEEE/PES,1995:1-8.
- [19] 熊小伏,欧阳前方,周家启,等. 继电保护系统正确切除故障的概率模型[J]. 电力系统自动化,2007,31(7):12-15.
XIONG Xiaofu,OUYANG Qianfang,ZHOU Jiaqi,et al. Probabilistic model for the relay protection system's correct failure removal[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(7):12-15.
- [20] 吕飞鹏. 基于配合关系计算复杂环网保护最优配合顺序的新方法[J]. 电力系统自动化,2005,29(24):65-69.
LÜ Feipeng. A novel method for determining the optimal coordination sequence of directional relays in a complicated multi-loop power networks based on coordination relationships of relays[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(24):65-69.
- [21] 张海翔,吕飞鹏,廖小君. 一种继电保护定值在线校核评估方法[J]. 电力系统自动化,2013,37(3):98-103.
ZHANG Haixiang,LÜ Feipeng,LIAO Xiaojun. An assessment method for on-line verification of relay protection setting[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(3):98-103.
- [22] 任建文,魏俊姣. 电力系统脆弱线路的识别及其输电断面搜索[J]. 电力自动化设备,2015,35(7):37-42.
REN Jianwen,WEI Junjiao. Vulnerable line identification and its transmission section search for power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(7):37-42.
- [23] 刘友波,刘俊勇,王民昆,等. 计及动能注入介数的线路暂态脆弱性快速评估[J]. 中国电机工程学报,2011,31(13):40-47.
LIU Youbo,LIU Junyong,WANG Minkun,et al. Fast assessment method for transient vulnerability of transmission lines based on kinetic energy injection betweenness[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(13):40-47.
- [24] BIALEK J. Tracing the flow of electricity[J]. IEE Proceedings of Generation,Transmission and Distribution,1996,143(4):313-320.
- [25] 鞠文云,李银红. 基于最大流传输贡献度的电网关键线路和节点辨识[J]. 电力系统自动化,2012,36(9):6-12.
JU Wenyun,LI Yinhong. Identification of critical lines and nodes in power grid based on maximum flow transmission contribution degree[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(9):6-12.
- [26] 陈德树. 大电网安全保护技术初探[J]. 电网技术,2004,28(9):14-18.
CHEN Deshu. Preliminary research on security protection technology of large-scale power grid[J]. Power System Technology,2004,28(9):14-18.

作者简介:



白懿鹏

白懿鹏(1991—),男,四川内江人,硕士研究生,通信作者,研究方向为电力系统继电保护及其可视化系统(E-mail:524705023@qq.com);

吕飞鹏(1968—),男,云南玉溪人,教授,博士,研究方向为电力系统继电保护和故障信息处理智能系统;

廖小君(1974—),男,四川德阳人,副教授,硕士,研究方向为电力系统继电保护;

李春海(1991—),男,福建长乐人,硕士研究生,研究方向为电压暂降分析与评估。

- [22] SUONAN Jiale, QI Jun. An accurate fault location algorithm for transmission line based on $R-L$ model parameter identification [J]. *Electric Power Systems Research*, 2005, 76(1-3): 17-24.

作者简介:

杨程程(1988—),女,陕西延安人,硕士研究生,通信作者,研究方向为电力系统继电保护(E-mail:chengchengyang10@



杨程程

126.com);

宋国兵(1972—),男,河南信阳人,教授,博士,研究方向为电力系统继电保护;

杨阳(1992—),女,河北衡水人,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护;

徐海洋(1992—),男,安徽滁州人,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护。

Distributed bus protection principle based on admittance parameter identification

YANG Chengcheng^{1,2}, SONG Guobing¹, YANG Yang¹, XU Haiyang¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Grid Materials Co. Ltd., Beijing 100120, China)

Abstract: As the existing distributed bus current differential protection is affected by the asynchronous sampling and transmission delay of bay data, a protection principle based on the admittance parameter identification is proposed. The voltage variable is introduced to calculate the admittance, the differential admittance is defined as the absolute summation of all bay admittances, and the braking admittance is defined as the summation of all absolute bay admittances. When an in-zone bus fault occurs, the braking admittance equals to the differential admittance; when an out-zone bus fault occurs, the differential admittance, reflecting the bus-ground stray capacitance, is much less than the braking admittance. The relationship between differential and braking admittances can be used to reliably distinguish an in-zone bus fault from an out-zone bus fault. EMTP simulation and actual fault-wave records show: being less affected by the transmission delay and better tolerant of the transition resistance, the proposed principle does not need the synchronous sampling of bay data and can identify the in-zone and out-zone bus faults in different operating conditions.

Key words: electric power system protection; distributed bus protection; differential protection; admittance; synchronous sampling; parameter identification; failure analysis

(上接第106页 continued from page 106)

Online vulnerable line identification based on multi-task asynchronous processing for power grid

BAI Yipeng¹, LÜ Feipeng¹, LIAO Xiaojun², LI Chunhai¹

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Company Skills Training Center, Chengdu 610072, China)

Abstract: A method based on the multi-task asynchronous processing is proposed to quickly and accurately identify the vulnerable lines of power grid. The protection vulnerability is defined with the comprehensive consideration of the cooperative correlation degree and the colligated consequence severity of line protections. The power-flow betweenness with the comprehensive consideration of the topological structure and the operating mode of power system is adopted to estimate the vulnerability of line structure. A line vulnerability index combining the protection vulnerability and the power-flow betweenness is thus given. The multi-task asynchronous processing mode is applied to divide the calculation of index into several task modules to be dealt with concurrently. Results of case calculation show that, with better identification performance and high identification accuracy, the proposed method shortens the required time of vulnerable line identification effectively, suitable for online application.

Key words: electric power systems; multi-task; asynchronous processing; vulnerable line; vulnerability; online identification; protection vulnerability; power flow betweenness