

文章编号:1000-582X(2011)12-067-05

应用邻接多重表存储结构的配电网可靠性评估算法

曹侃, 谢开贵, 胡博, 李春燕

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要:结合复杂配电网的特点,提出基于邻接多重表的复杂配电网可靠性评估分块算法。首先给出适合于配电网数据存储的邻接多重表构造方法及存储结构,解决了网络搜索的空间、时间复杂度问题。基于此提出配电网前推回代潮流计算方法及配电网可靠性评估的分块形成算法。该算法可使配电网潮流计算与可靠性评估分块算法采用同种存储结构,简化了配电网可靠性计算程序的编制,并可节省计算时间。应用该算法对 RBTS-BUS6 及实际工程系统进行了可靠性评估,算例表明该算法可有效减少计算时间,具有较高的工程实用价值。

关键词:配电网;邻接多重表;潮流计算;可靠性评估;分块算法

中图分类号:TM732;TM727

文献标志码:A

Reliability evaluation algorithm for complex electrical distribution networks using the storage structure of adjacency multilist

CAO Kan, XIE Kai-gui, HU Bo, LI Chun-yan

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: A section algorithm of reliability evaluation for complex medium voltage Electrical Distribution Networks (EDNs) using adjacency multilist (AM) is proposed. The constructing method for AM is introduced. The AM can be used to store the structure data of EDNs and to solve the problem of space & time complexity. A new power flow algorithm of backward / forward sweep is proposed and a fast algorithm of forming sections in distribution network is put forward. The proposed algorithm makes a perfect combination of the power flow algorithm and the section algorithm of reliability evaluation, which makes efforts to decrease the work of programming and saves the computing time. Applying the proposed algorithm in RBTS-BUS6 system and actual EDNs, the reliability assessment results show that the algorithm has an advantage of saving time and possesses efficiency in engineering practicality.

Key words: electrical distribution networks; adjacency multilist; power flow calculation; reliability evaluation; section algorithm

收稿日期:2011-07-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50777067);输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究资助项目(2007DA10512709103);重庆市自然科学基金重点资助项目(CSTS,2008BC7031)

作者简介:曹侃(1982-),男,重庆大学博士研究生,研究方向为电力系统规划与可靠性,(Tel)023-65104784;(E-mail)cqu.caokan@yahoo.com.cn。

谢开贵(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(Tel)023-65112729;(E-mail)kaiguixie@yahoo.com.cn。

随着经济的发展和城市的现代化,人们对供电可靠性的要求越来越高。因此,快速准确的对复杂配电网进行可靠性评估成为国内外专家关注的焦点^[1-6]。

目前,对配电网进行可靠性评估的常用方法是故障模式后果分析法(FMEA)^[1]。该方法分析每个元件的故障及后果,建立故障模式后果表,并根据元件的可靠性数据形成系统可靠性指标。当网络结构复杂时,故障模式后果表的建立将相当复杂。文献[2]在 FMEA 的基础上提出基于故障扩散的可靠性评估搜索算法,该方法通过网络搜索确定故障隔离范围,从而确定各节点的故障类型,并形成可靠性指标。该算法可处理复杂配电网,但计算速度有待提高。文献[3]提出配电网可靠性评估的最小路法,该方法先求出每个负荷的最小路,将非最小路上元件的故障折算到最小路上,仅对最小路上的元件进行可靠性评估就可得到负荷和系统的可靠性指标。当系统较复杂时,最小路求取计算复杂性较大。文献[4-5]提出基于网络等值法的可靠性评估算法,利用等值无件替代部分配电网,从而将复杂配电网逐步简化。但该方法难以得到节点可靠性指标且编程复杂。文献[6]提出复杂配电网可靠性评估的分块算法,该算法以块为单位进行故障枚举,可快速形成节点和系统可靠性指标。但该文以邻接矩阵存储结构形成分块,分块方法复杂,且可靠性计算与潮流计算采用不同的存储结构,两种计算交替进行时需转换存储结构,影响计算效率。

笔者提出基于邻接多重表的复杂配电网可靠性评估分块算法。以块为单位进行可靠性枚举,可有效减少计算时间;以邻接多重表存储配电网结构,解决了网络搜索的空间、时间复杂度问题;配电网潮流计算与可靠性分块算法使用同种存储结构,简化了配电网可靠性评估程序的编制。

1 配电网的邻接多重表存储

工程计算中,需由文件或数据库向计算机内存读入配电网的节点和线路数据,并以某种数据结构存储。文献[7]采用邻接矩阵存储,该结构直观且处理方便,但需较大的存储空间和搜索时间。文献[8]采用单链表、树状链表等存储,该结构所需存储空间小,但存储时须确定节点的父子关系,在联络开关切换后潮流反向,处理稍显复杂。文献[9]将配电网表示成无向图并采用邻接表存储,减小了网络搜索的复杂度,但无向图的邻接表存储方法使每条边在图中存储了两次,给图的某些操作(如检测边是否访问过、删除边等)带来不便。因此,提出用邻接多重表结构存储配电网数据,可缓解网络搜索的空间、时

间复杂度问题,便于网络搜索的编程实现。

基于邻接多重表数据结构^[10]的配电网无向图由网络类、节点类和支路类组成。网络类由一个节点类对象的主链表、支路类及支路链表组成。节点类对象的主链表用于保存图中的所有节点对象,每个节点对象中存在一个指向与该节点相连的支路类的指针。支路类对象中存在两个指针,分别为支路的首节点和末节点指向下一个支路对象的指针,从而构成支路链表。由于支路首、末节点均有指向与该节点相连的下一支路的指针,故基于邻接多重表存储结构的无向图中每条支路可只存储一次。

如图 1 为一简单中压配电网(带子馈线)。

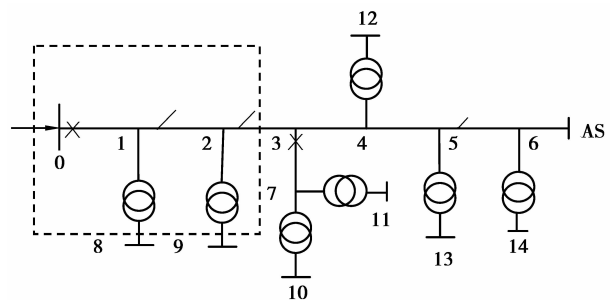


图 1 简单中压配电网(带子馈线)

图 2 给出了图 1 中虚线部分的邻接多重表存储结构示意图。

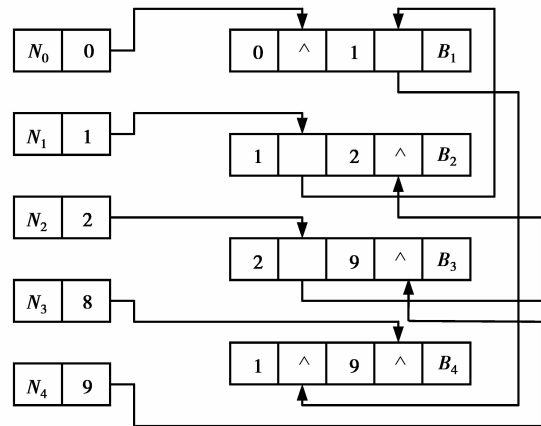


图 2 邻接多重表存储结构示意图

图 2 中, N_i 存储节点 i 的信息,如节点名、节点电压、节点注入功率等; B_i 存储支路 i 的信息,如支路线长、线型、电气参数及可靠性参数等。从节点类主链表中的任一个节点类对象出发,均可找到与该节点相连的所有支路。如从节点 1 出发,从节点对象的支路指针开始,可顺次找到支路 1-2、0-1、1-8。因此,可网络类中定义基于邻接多重表的深度优先遍历、新增节点、增删支路等网络搜索方法,便

于可靠性计算时进行网络分块及故障节点分类等。

采用邻接表存储无向图时每条支路在网络类中均存储了两次,而采用邻接多重表结构时只需存储一次。故采用邻接多重表结构的无向图不仅节省了数据的存储空间,且在进行图的遍历、增删节点或支路等操作时可简化步骤,节省计算时间。

2 基于邻接多重表存储结构的潮流算法

文献[11]提出的电流型和功率型潮流的前推回代法在辐射状配电网的潮流计算中应用较为普遍,但该方法需在根节点处增加了一条虚拟支路并形成支路关联矩阵,并依此建立了树状网的潮流算法。本文提出了基于邻接多重表的前推回代潮流算法,不用形成关联矩阵,避免了矩阵运算,提高了计算效率。在对配电网进行可靠性评估计算时,需对网络进行遍历等搜索操作,直接应用邻接多重表的存储结构计算配电网潮流,可避免交替进行潮流计算和可靠性计算时网络存储格式的频繁转换,提高了计算效率并减小了编程难度。

如图 2 所示的邻接多重表,节点类主链表中的任一个节点对象都指向一个支路链表,该支路链表即为该节点所连的所有支路。如节点 2 所连的支路为 2-9、1-2。由 KCL 定理,对电路中的任何一个节点,流入此节点的电流的代数和为零,即邻接多重表中每个节点所指的支路链表的所有支路电流的和为零。

给定各节点初始电压,将负荷处理为节点的注入电流,则节点 i 的注入电流矢量 I_{Ni} 可由节点注入功率 S_i 和节点电压 V_i 求得

$$I_{Ni} = \frac{\dot{S}_i}{\dot{V}_i} \quad (1)$$

首先计算出带负荷支路的电流。从首节点出发搜索各节点的支路链表,找到有且仅有一个支路电流未计算的链表,根据 KCL 定理计算出该支路的电流。重复以上过程,直至每条支路的支路电流全部算出。

由此可得出每条支路的支路电流 I_L 。然后由给定的根节点初始电压,由式(2)从邻接多重表首节点的支路链表向后计算,可得到各节点电压

$$\dot{V}_j = \dot{V}_i - \dot{I}_{Lij} \dot{Z}_{ij} \quad (2)$$

式(1)、(2)即构成配电网潮流迭代算法,以前后两次求得的节点电压的差值作为算法的收敛条件,具体步骤如下:

1) 给定各节点初始电压 V_i ,由式(1)得负荷节点注入电流 I_{Ni} ;

2) 搜索有且仅有一个支路电流未计算的支路链表,计算出该支路电流 I_L ;

3) 若已得到所有支路的电流,转 4),否则转 2);

4) 由式(2)从首节点的支路链表向后计算,得各节点电压;

5) 若满足收敛条件则结束计算,否则转 2)。

3 复杂配电网可靠性评估分块算法

笔者提出基于邻接多重表结构的可靠性评估分块算法,将配电网以无向图的形式表述,分块形成算法直观,编程方便,且与配网潮流计算采用同一存储结构,交替计算时无需结构转换。

3.1 网络分块方法

记 $C_{i-j(i)}$ 、 $C_{i-j(j)}$ 分别表示支路 $i-j$ 首端、末端的开关位置。

从首节点出发对网络进行深度优先遍历^[10],若 $C_{i-j(i)}$ 上有断路器、分段开关、负荷开关、隔离开关等,则删除该支路,新增一节点并与节点 j 相连。此操作后将原连通的网络根据开关的分断位置分割成若干块。再对整个网络进行一次遍历操作,就可以得到各块所包含元件集合,并可计算各块的等效可靠性参数。

用前述方法处理图 1 配电网中的开关,对整个网络进行遍历后可得到 5 个不连通的子网络,每个子网络则为一个块。再分别从每个块中的任一元件出发,对块进行遍历,得到块所包含的元件集合。

根据分块中元件故障影响后果知,块中任一元件故障对整个网络的影响相同,故可以块为单位对配电网进行可靠性评估。设块中包含的元件集为 N ,第 i 个元件的故障率和修复时间分别为 λ_i 、 r_i 。该块的等效故障率和等效平均修复时间^[6]分别为 λ_K 、 r_K 。那么

$$\lambda_K = \sum_{i \in N} \lambda_i \quad (3)$$

$$r_K = \frac{\sum_{i \in N} \lambda_i r_i}{\lambda_K} \quad (4)$$

3.2 前向断路器搜索

若块中元件故障导致某断路器跳闸,则定义该断路器为该块的前向断路器。在图 1 中,删除各断路器所在支路 $i-j$,新增一个节点并与节点 j 相连,再对网络进行深度优先遍历,得到 2 个分块,块的前向断路器即为与该块中新增节点对应的断路器。再分别对各块进行一次遍历操作,就可以得到各块所对应的前向断路器。

3.3 按块枚举故障及节点故障类型分类

根据文献[2]的故障节点分类方法,将节点按其

故障时间分为 a、b、c、d 4 类。a 类节点:正常节点,即故障事件发生后开关正确动作不受故障影响的节点,故障时间为 0;b 类节点:故障隔离节点,故障时间为隔离操作时间的节点;c 类节点:故障切换节点,故障时间为隔离操作加切换操作时间的节点;d 类节点:故障节点,故障时间为元件修复时间的节点。

以块为单位进行故障枚举时,在原网络中删除该块的节点和支路,并断开该块的前向断路器,将网络重新分割成若干块。对网络进行遍历,可得到各块的元件集合。根据各块与电源、前向断路器或联络开关的连接关系,可确定各块中节点的类型:若块与电源直接相连,则块中的节点为 a 类节点;若块与前向断路器相连,则块中的节点为 b 类节点;若块与联络开关相连而未与电源或前向断路器相连,则块中的节点为 c 类节点;若块为故障块或孤立块,则块中的节点为 d 类节点。

3.4 基于分块算法的 FMEA 表

用上述方法对网络分块并以块为单位进行故障枚举,可得到各节点的可靠性指标并建立 FMEA 表。根据 FMEA 表即可求得负荷节点和系统可靠性指标,如系统平均停电频率指标(SAIFI)、系统平均停电持续时间指标(SAIDI)、平均供电可用率指标(ASAI)、缺供电量指标(ENS)等^[1]。

3.5 算法描述

利用 3.1 节所描述的分块方法将系统分成若干块,以块为单位进行故障枚举,可得系统可靠性指标。文中算法可描述为:

- 1) 读入原始数据并构造网络的邻接多重表;
- 2) 计算正常状态下的潮流;
- 3) 按 3.1 所述方法将网络划分为若干块;
- 4) 以块为单位枚举故障事件;
- 5) 按 3.2 和 3.3 所述方法确定故障节点及类型;
- 6) 计算故障状态下的潮流;
- 7) 判断电压和线路容量是否越限,如果有越限则削减负荷,否则继续;
- 8) 计算节点可靠性指标;
- 9) 若故障事件枚举未结束,则转 4), 否则继续;
- 10) 形成系统可靠性指标并输出结果。

4 算例

利用以上算法在 VC++6.0 上编制了相应程序,应用本文所提出的基于邻接多重表的复杂配电网可靠性评估算法对 RBTS-BUS6 和 724 节点、2138 节点的实际系统进行可靠性评估。

RBTS-BUS6^[12] 系统有 40 个负荷点、2 398 个用户,负荷点有功功率为 10.72 MW。采用文中算

法得到该系统馈线及系统可靠性指标如表 1 所示。表中 SAIFI、SAIDI、CAIDI、ENS 分别为系统平均停电频率指标、系统平均停电持续时间指标、用户平均停电持续时间指标、缺供电量指标,单位分别为次/(a·用户)、h/(a·用户)、h/(a·用户)、(kW·h)/a;ASAI 为平均供电可用率指标。

表 1 RBTS-BUS6 馈线及系统可靠性指标

馈线	SAIFI	SAIDI	CAIDI	ASAI/%	ENS
1	0.335 7	3.692 0	10.999 0	99.957 9	4242.678 0
2	0.364 7	3.724 0	10.13 7	99.957 5	4731.892 0
3	0.228 5	0.864 0	3.780 0	99.990 1	3084.490 0
4	1.977 8	11.075 0	5.600 0	99.873 6	577 91.073 0
系统	1.006 5	6.654 0	6.611 0	99.924 0	69 850.132 0

国内某 724 节点配电网有 10 条馈线,共分 170 块,某 2138 节点配电网有 31 条馈线,共分 210 块。分别采用本文算法和文献[2]故障扩散法和文献[6]分块算法,对以上配电网的可靠性评估。其可靠性指标如表 2-3 所示。在 CPU 主频 2.53 G,内存 512 M 的 PC 机上,文中算法与其它算法的性能比较如表 4 所示。

表 2 某 724 节点系统可靠性指标比较

方法	SAIFI	SAIDI	CAIDI	ASAI/%	ENS
文献[2]	1.856 9	8.407	4.528	99.904 027	269 243.24
文献[6]	1.856 9	8.407	4.528	99.904 027	269 243.24
本文	1.856 9	8.407	4.528	99.904 027	269 243.24

表 3 某 2138 节点系统可靠性指标比较

方法	SAIFI	SAIDI	CAIDI	ASAI/%	ENS
文献[2]	1.620 0	7.477	4.616	99.9146 41	485 807.37
文献[6]	1.620 0	7.477	4.616	99.914 641	485 807.37
本文	1.620 0	7.477	4.616	99.914 641	485 807.37

表 4 不同方法的性能比较

系统	方法	时间/s			内存 占用/MB
		潮流 计算	可靠性 计算	总时间	
724 节点	文献[2]	1.78	2.41	4.19	4.7
	文献[6]	0.46	0.79	1.25	3.2
	本文	0.31	0.73	1.03	1.5
2138 节点	文献[2]	21.63	30.44	52.07	12.3
	文献[6]	2.34	3.28	5.62	8.6
	本文	1.49	2.72	4.21	3.2

由表 4 知,2138 节点系统共分为 210 块,文献 [2]对单元件进行故障枚举,而用分块算法只须枚举 210 次,节省了大量的潮流计算和网络搜索时间,本文算法所用时间约为文献 [2]的 1/10,验证了上述观点。采用邻接多重表存储配电网,用深度优先搜索算法形成分块并确定节点故障类型,避免了矩阵的存储和运算,对大规模配电网进行可靠性评估时耗时较少。由于潮流计算和可靠性计算采用同种存储结构,避免了形成关联矩阵的过程,使本文计算程序的内存占用量较小。在上述两个算例系统中,算法所占内存仅为文献 [6]的 47%和 37%。

5 结 论

结合复杂配电网的特点,提出基于邻接多重表的可靠性评估分块算法,并提出了配电网前推回代潮流算法。邻接多重表存储结构特别适合无向图的搜索,利用网络搜索形成分块并确定节点故障类型。可靠性评估过程中,切换开关动作后,需对网络进行故障状态的潮流计算。提出的潮流计算算法可直接利用新网络的邻接多重表计算网络潮流,与可靠性算法有机结合,提高了算法效率且简化了编程。

在配电网的重构分析^[13]及配电网开关优化配置^[14-15]中,每次网络结构改变或增装开关,都须对配电网进行一次可靠性评估,可靠性评估的速度成了制约这些应用的关键问题。本文算法在计算速度、内存占用量、程序设计等方面均有较大改进,具有工程实用价值。

参考文献:

- [1] WENYUAN L. Risk assessment of power systems models, methods, and application[M]. Hoboken:John Wiley & Sons, 2005.
- [2] 谢开贵,周平,周家启,等. 基于故障扩散的复杂中压配电系统可靠性评估算法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(4): 45-48.
XIE KAI-GUI, ZHOU PING, ZHOU JIA-QI, et al. Reliability evaluation algorithm for complex medium voltage radial distribution networks based on fault-spreading-method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(4): 45-48.
- [3] 戴雯霞,吴捷. 基于最小路的配电网可靠性快速评估法[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(7): 29-31.
DAI WEN-XIA, WU JIE. Fast evaluation for distribution network reliability based on minimal path[J]. Electrical Power Automation Equipment, 2002, 22(7): 29-31.
- [4] BILLINTON R, WANG P. Reliability network equivalent approach to distribution system reliability evaluation[J]. IEE Proceedings-C, 1998, 145(2): 149-153.
- [5] 万国成,任震,田翔,等. 配电网可靠性评估的网络等值法模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 48-52.
WAN GUO-CHENG, REN ZHEN, TIAN XIANG, et al. Study on model of reliability network equivalent of distribution system reliability evaluation [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 48-52.
- [6] 刘柏私,谢开贵,马春雷,等. 复杂中压配电网可靠性评估分块算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 40-45.
LIU BO-SI, XIE KAI-GUI MA CHUN-LEI, et al. Section algorithm of reliability evaluation for complex medium voltage electrical distribution networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 40-45.
- [7] 束洪春,刘宗兵,朱文涛. 基于图论的复杂配电网可靠性评估方法[J]. 电网技术, 2006, 30(21):46-49.
SHU HONG-CHUN, LIU ZONG-BING, ZHU WEN-TAO. A new method of reliability evaluation for complex distribution network based on graph theory[J]. Power System Technology, 2006, 30(21):46-49.
- [8] GOSWAMI S K, BASU S K. Direct solution of distribution systems [J]. IEE Proceedings-C, 1991, 138(1):78-88.
- [9] 邱生,张焰,孙建生,等. 用邻接表保存中压配电网拓扑结构[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(3):57-59.
QIU SHENG, ZHANG YAN, SUN JIAN-SHENG et al. Adjacency list saving topology structure of mid-voltage distribution system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(3):57-59.
- [10] FRANK D, ANDREW R et al. Algorithms and data structures[M]. Heidelberg: Springer, 2001.
- [11] 张尧,王琴,宋文南,等. 树状网的潮流算法[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(3):217-220.
ZHANG YAO, WANG QIN, SONG WEN-NAN, et al. A load flow algorithm for radial distribution power networks [J]. Proceeding of the CSEE, 1998, 18(3):217-220.
- [12] BILLINTON R, JONNAVITHULA S. Optimal switching device placement in radial distribution systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(3): 1646-1651.
- [13] AHUJA A, DAS S, PAHWA A. An AIS-ACO hybrid approach for multi-objective distribution system reconfiguration [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 1101-1111.
- [14] CHEN C S, LIN C H. Optimal placement of line switches for distribution automation systems using immune algorithm [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1209-1217.
- [15] MORADI A, FOTUHI-FIRUZABAD M. Optimal switch placement in distribution systems using trinary particle swarm optimization algorithm[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(1): 271-279.

(编辑 张小强)