

文章编号:1000-582X(2003)07-0028-04

大电网可靠性计算中的负荷削减策略*

吴开贵,吴中福

(重庆大学计算机学院,重庆 400044)

摘要:为了改善现有的电网可靠性评估算法,提出了失效事件流量、失效事件的送端和受端、受端削减域、负荷削减域的度等基本概念,阐明了相关定义,丰富了LCSN(Load Curtail Strategy by Near)的内涵。在此基础上,研究了求负荷削减域的算法,导出了相关公式,为进一步研究LCSN提供了理论基础。应用表明,该算法提高了可靠性的计算效率。

关键词:可靠性;算法;电力系统

中图分类号:TM732; TM711

文献标识码:A

文献[1-2]提出了用线性优化神经网络对系统负荷削减进行行为分析,取得了一定进展,但若缺乏神经网络硬件的支持,要实用化和商用化仍然相当困难。文献[3-4]用RBF神经网络对预想事故进行分类,提出了基于RBF神经网络的电网可靠性评估模型,提高了可靠性计算效率。事实上,对系统负荷削减分析在电网可靠性计算分析中也占有重要地位。根据电力系统的运行实际情况,发展了就近负荷削减策略LCSN,提出了失效事件流量、失效事件的送端和受端、受端削减域、负荷削减域的度等基本概念,阐明了相关定义,提出了求负荷削减域的算法,推导了相关公式,并把它用到了电力可靠性分析中,大大提高了计算效率。

电网可靠性评估实质上是对发电容量的充裕度计算分析^[5],可分3个步骤:1)网络可靠性逻辑结构等效图的形成^[6];2)通过潮流计算,获取失效事件;3)对失效事件进行负荷削减分析,形成可靠性指标。文献[1]对这3个步骤的计算时间进行了详细研究,其中,第2步占的计算时间最多,其次是第3步。因此,如果能提高负荷削减算法的计算速度,那么,电网可靠性的评估效率将会进一步提高。

1 基本概念

当电力系统发生故障时,就要对系统的负荷进行削减调度,以使系统恢复到正常状态。事实上,事故的

影响一般是在故障点就近的一个范围内,基于这种思路,研究了LCSN策略。首先给出如下定义:

定义1 失效事件。如果某一支路集合 F_i 的每条支路都发生停运时,系统将发生功率短缺,则称支路集合 F_i 为系统的一个失效事件。系统所有失效事件构成的集合称为系统的失效事件集,记为 F 。

定义2 失效事件流量。系统在正常情况下,流过失效事件 F_i 全部支路有功功率绝对值的总和,叫失效事件 F_i 的流量。

定义3 失效事件的送端和受端。如果一支路集合 F_i 是一个失效事件,那么当系统正常运行时可以通过潮流计算得到该 F_i 中各条支路的潮流及其流向,流进为起点,流出为终点,把 F_i 上的所有起点集合 S_i 称为 F_i 的送端,把 F_i 上的所有终点集合 R_i 称为 F_i 的受端。

当 F_i 是一个失效事件时,负荷的削减是从 F_i 的受端开始,因为受影响的是受端的用户。因此要使系统恢复正常运行,必须削减受端用户的负荷。但是负荷削减的范围和多少则是必须解决的问题。给出如下定义。

定义4 受端削减域。是与受端有直接或间接关联的,且除去送端节点的节点集合。

定义5 负荷削减域的度。如何描述受端削减域的范围的大小,提出负荷削减域的度的概念。与受端直接关联的且除去送端的受端削减域,称为1度负荷削减域。与1度负荷削减域直接关联的且除去送端的受

* 收稿日期:2003-03-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60073047)

作者简介:吴开贵(1966-),男,重庆人,重庆大学博士后,主要从事神经网络、电力系统可靠性评估及电子商务等研究。

端削减域称为 2 度负荷削减域。以此类推可以定义 N 度负荷削减域。要解决的一个主要问题就是在电网可靠性计算分析中,负荷削减域为多大时,可靠性评估的值才合理。

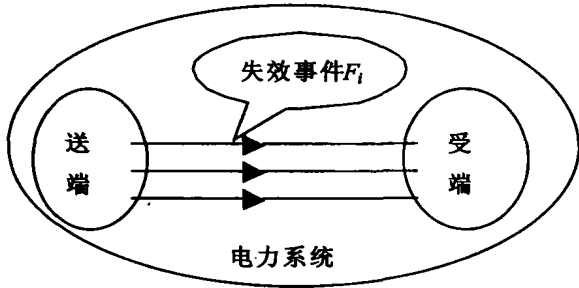


图 1 就近负荷削减原理

2 LCSN 模型

一个网络 $G(V, E) = (V, E, S, T, f)$ 是一个具有特定点集 $S \in V$ 和 $T \in V$ 的有向图以及一个在 $G(V, E)$ 的边集 E 上定义的非负的函数 f 。其中,子集 S 称为网络的源点集,子集 T 称为网络的受点集, V 为顶点集,非负函数 f 称为网络 $G(V, E)$ 的容量函数,它在弧 a 上的值 $f(a)$ 称为 a 的容量(弧 a 的最大容许通过量)。如果弧 a 由节点 i 指向节点 j ,则 $f(a)$ 亦可记成 $f(i, j)$ 。

设 $G(V, E)$ 是一个网络,它的每条弧(边) (i, j) 对应有一数值 $f_f(i, j)$,如果这些值 $f_f(i, j)$ 满足下列条件:

1) 容量限制条件

$$0 \leq f_f(i, j) \leq f(i, j) \quad i, j \in V$$

即每一条边 (i, j) 的流量 $f_f(i, j)$ 必须小于或等于该边的容量 $f(i, j)$ 。

2) 流量平衡条件。对于给定点 $i \in V$, 有

$$\sum_{j \in V} f_f(j, i) - \sum_{j \in V} f_f(i, j) = \begin{cases} F & i \in S \\ 0 & i \in S, i \in T \\ -F & i \in T \end{cases} \quad (1)$$

即当 i 是源点时,流入点 i 的流量 $\sum_{j \in V} f_f(j, i)$ 与流出 i 的流量 $\sum_{j \in V} f_f(i, j)$ 应该为 F , F 为网络的输入容量;当 i 是受点时,流入点 i 的流量 $\sum_{j \in V} f_f(j, i)$ 与流出 i 的流量 $\sum_{j \in V} f_f(i, j)$ 应该为 $-F$;当 i 既不是源点,也不是受点时,流入点 i 的流量 $\sum_{j \in V} f_f(j, i)$ 与流出 i 的流量 $\sum_{j \in V} f_f(i, j)$ 相等。

如果满足这两个条件,那么就称这些 $f_f(i, j)$ 的集合 $\{f_f(i, j)\}$ 为网络 $G(V, E)$ 的一个可行流,记为 F_N 。

在电力系统中,可用标号法、线性规划法,直流潮流法,交流潮流法等获取网络流^[1]。在正常情况下,可以计算出一个网络正常运行的流 F_N ,因此可以用正常运行的流来研究就近负荷削减的模型。

定义 6 点集的关联关系。设 $G(V, E)$, 节点间的关联矩阵为 A ,把点集的关联关系 f_v 定义为点集的映射, $V_1 \rightarrow V_2$,即 V_2 是 V_1 通过关联矩阵 A 直接找到的点集,记为 $f_v(V_1) = V_2$ 。

定理 1 设事件 F_i 的度为 n ,事件 F_i 的送端为 V_s ,受端为 V_r ,节点间的关联矩阵为 A ,那么 V_r 的 n 度负荷削减域的计算公式为:

$$(V_r)_n = f_v((V_r)_{n-1}) - V_s \quad (2)$$

证明 V_r 的 1 度负荷削减域为

$$(V_r)_1 = f_v(V_r) - V_s \quad (3)$$

V_r 的 2 度负荷削减域为

$$(V_r)_2 = f_v((V_r)_1) - V_s \quad (4)$$

假设 V_r 的 n 度负荷削减域为

$$(V_r)_n = f_v((V_r)_{n-1}) - V_s \quad (5)$$

那么, V_r 的 $n + 1$ 度负荷削减域为

$$(V_r)_{n+1} = f_v((V_r)_n) - V_s \quad (6)$$

因此,由归纳法结论成立。证毕。

式(2)是一个递归算式,可用递归法求出 $(V_r)_n$,即负荷削减的范围。一般来讲,有 3 种负荷削减方式:一是在负荷削减域内平均削减负荷,二是在负荷削减域内按重要程度削减负荷,三是负荷削减域内随机削减负荷。在可靠性分析中,宜采用第 1 种或第 2 种。

设负荷削减域为 $(V_r)_n$,节点 $i \in (V_r)_n$,节点 i 的负荷量为 p_i ,下面来导出负荷削减公式及算法。

平均削减负荷:就是在荷削减域内,按照一定比例 k ,削减用户的负荷。这种负荷削减方式的优点是计算简单,便于程序设计。但是,在实际运行中,它没有考虑负荷的重要程度。其负荷削减公式为:

$$(L_p)_i = k \cdot p_i / \sum_{i \in (V_r)_n} p_i \quad (7)$$

式中 $(L_p)_i$ 是节点 v_i 的负荷削减量, k 为负荷削减比例,如 0.1 等。

按重要程度削减负荷:就是在荷削减域内,按照用户的重要程度,削减用户的负荷。这种负荷削减方式在实现上较平均削减负荷复杂,但是它更接近实际电网运行的要求。假设用户的重要程度分为 i_{\max} 类,其中第 1 类最重要,第 i_{\max} 类重要程度最低;因此,该负荷削减方式可表示为下列算法:

- 1) 选择重要程度 i ,从第 i_{\max} 类开始;
- 2) 把第 i 类负荷从 $(V_r)_n$ 中切除;

3) 系统是否恢复正常,如果不能恢复正常,置 $i = i - 1$,转第2步;

4) 结束。

因为该算法是在 $(V_c)_n$ 中进行切负荷,所以计算速度很快。

随机削减负荷:就是在负荷削减域内,随机地削减用户的负荷。给出如下计算公式:

$$(L_p)_i = k_i \cdot P_i / \sum_{i \in (V_c)_n} P_i \quad (8)$$

式(8)中 $(L_p)_i$ 是节点 v_i 的负荷削减量, k_i 为随机产生的负荷削减比例,且满足 $0 < k_i < 1$ 。

3 LCSN 的算法描述

就近负荷削减的关键在于如何找出负荷削减域,用递归方法导出负荷削减域。设事件 F_i 的送端节点集为 S ,受端节点集为 R ,负荷削减域的度为 N ,算法可描述为:

第1步,设置计数器 i ;

第2步,通过网络的拓扑关系,找出受端节点集 R 的1度负荷削减域 R_1 ;

第3步,计算集合 $R_i = R_1 - S$,即在负荷削减域 R_1 中除去事件的 F_i 的送端节点集 S ;

第4步,计数器 i 加1;

第5步,如果 i 等于 N ,则程序退出;

第6步,如果 i 小于 N ,转到第2步;

第7步,结束。

通过以上步骤,即可找出满足一定度数 N 的负荷削减域 $(V_c)_n$ 。其算法流程示于图2。

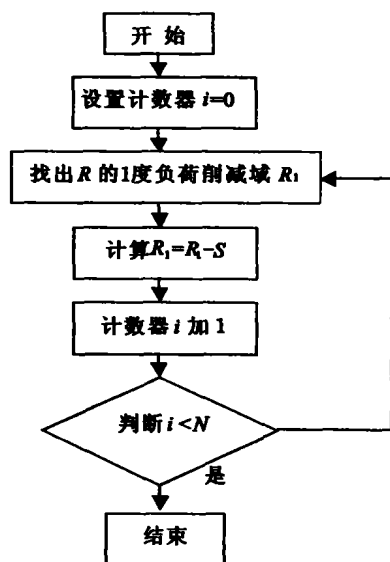


图2 求负荷削减域算法

找出了负荷削减域后,就可以进行负荷削减,实现上述3种不同的负荷削减方式。算法可描述为:

第1步,设置参数;

第2步,求负荷削减域 $(V_c)_n$;

第3步,选择负荷削减方式;

第4步,削减负荷;

第5步,系统是否恢复正常,如果不能恢复正常,转第4步;

第6步,计算 $(V_c)_n$ 中节点的负荷削减量;

第7步,结束。

该算法框图示于图3。在具体实施过程中,设置了2个控制变量,一个是每次负荷削减的百分比,二是失效事件的度,用这2个参数来控制负荷削减过程。

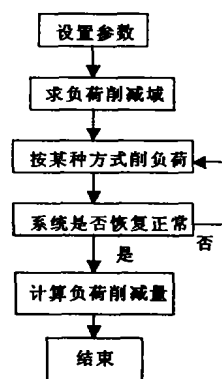


图3 负荷削减策略算法

4 计算结果分析

应用上述 LCSN 模型,对 IEEE RTS24 节点系统进行可靠性计算分析。其中,发电机故障考虑到3阶,线路故障考虑到2阶,每次削减10%,交流潮流的可靠性计算结果如表1所示。LOLP (Loss - Of - Load Probability) 表示失负荷概率, EENS (Expected Energy Not Supplied) 表示平均每年缺电度数^[5]。

表1 就近负荷削减策略的计算结果

负荷削减域的度	失负荷概率 LOLP	电力不足期望 EENS/(kW·h/年)
1	0.055 87	2 637.0
2	0.055 87	821.3
3	0.055 87	477.4
4	0.055 87	477.4
5	0.055 87	477.4

从表1可以看出,当一个失效事件发生时,它的影响一般只波及到一定范围,而不是整个系统。特别是在电网可靠性计算分析中,负荷削减域的度考虑3度即可。

5 结论

首先提出了失效事件流量、失效事件的送端和受端、受端削减域、负荷削减域的度等基本概念。其次研究了求负荷削减域的算法,推导了相关公式,为进一步研究 LCSN 提供了理论基础。基于上述理论,开发了相应软件,并对 IEEE - RTS24 系统进行了可靠性计算,分析了失效事件对系统的影响程度。计算结果表明:该模型和算法具有良好的工程实用价值。

参考文献:

[1] 吴开贵. 电力系统可靠性评估的智能模型及算法研究

[D]. 重庆:重庆大学,1999.

- [2] 吴开贵,李学明,吴中福. 基于 NLPNN 的电网可靠性评估模型[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2003,26(3): 35-38.
- [3] 吴开贵,张安邦,周家启. 基于自组织 RBFN 神经网络的预想事故分类器的设计[J]. 中国电机工程学报,1999,19(12):61-64.
- [4] 吴开贵,王韶,张安邦,等. 基于 RBF 神经网络的电网可靠性评估模型的研究[J]. 中国电机工程学报,2000,20(12):9-12.
- [5] BILLINTON R, LI WENYUAN. Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods [M]. New York: Plenum Press, 1994.
- [6] BILLINTON R 著. 电力系统可靠性评估[M]. 周家启,任震译. 重庆:科学技术文献出版社重庆分社,1986.

Load Curtailment Strategy by Near in Bulk Power Systems Reliability Evaluation

WU Kai-gui, WU Zhong-fu

(College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to improve the existing method of electric network reliability evaluation, the basic concepts, for example, the flow through the failure events, the sent ends and received ends of these failure events, the load curtailment region of the received ends and the degree of the load curtailment, are defined. With these concepts, the connotation of LCSN (Load Curtail Strategy by Near) is enriched and algorithms of the load curtailment region are conducted. The theory foundation for further exploring LCSN is created. The results show that the algorithm can quickly and effectively make reliability assessment of power systems.

Key words: reliability; algorithm; power system

(编辑 张 苹)