

文章编号:1000-582X(2003)10-0052-04

大电网可靠性评估最优负荷削减模型*

刘洋,周家启

(重庆大学电气工程学院,重庆 400044)

摘要:研究电网可靠性评估中考虑最优负荷削减的问题。针对大电网系统,先在系统分析中将系统状态分为4种不同情形,对可能产生负荷削减的系统状态引入其最优负荷削减模型,在模型的目标函数中设置使负荷削减自动满足按临近原则和按负荷重要程度进行削减的加权因子,并在可靠性评估中的程序编制中予以实现。该最优模型与实际负荷削减策略保持一致,能够得到反映电网真实可靠性水平的母线节点指标。文章给出了该最优负荷削减模型,以及相应算法,程序流程图。通过具体算例验证了该模型的有效性和实用性。

关键词:电网可靠性评估;最优负荷削减;大电网系统;负荷削减原则

中图分类号:TM 715

文献标识码:A

目前,在电力系统可靠性计算中,由于受计算时限和计算精度的影响,在紧急状态需要进行负荷削减时,一般都采用按负荷重要程度,或按临近原则直接进行削减^[1-4]。这与最优理论下的负荷削减相比,可能有很大一部分负荷是没有必要削减的。采用这样的负荷削减策略所计算出来的可靠性指标,当然就不能真实反映该网络系统能够达到的可靠性水平。随着电力系统的发展,竞价上网的电力体制改革,用户对电力系统可靠性提出了更高的要求,为此,电力公司正从根本上改变其商业运作方式。电力公司要尽可能地获得高的可靠性,减少用户的停电损失,其中一个有效的方式就是在每次紧急故障状态尽可能少的对系统中的负荷进行削减。这就产生了在负荷削减过程中引入最优规划技术的必要性。

1 大电网可靠性评估的系统状态分析

大电网可靠性计算或者说充裕度计算是一项复杂的计算,它包括三方面的计算:系统状态的获取和该状态下的系统分析,然后通过计算一系列的可靠性指标来定量反映网络系统传输电能的能力。就采用解析枚举法计算大电网系统可靠性而言,各个指标的形成需要枚举大量的系统故障状态,然后才对各故障状态进行系统分析,这包括:基本潮流计算,判断是否有元件过载,判断系统是否解列,负荷削减的计算。最后累加形成系统和各负荷点的可靠性指标。可以看出电力系

统的可靠性计算其核心就是系统分析计算。

需要指出的是,当通过枚举法或者 Monte Carlo 抽样法得到某一系统状态后,需要判断该状态属性,一系统状态可属于4种不同的情形:

- 1) 正常状态;
- 2) 明显不会产生负荷削减的紧急状态;
- 3) 通过调节机组开停可避免负荷削减的紧急状态;
- 4) 通过调节机组开停也无法避免负荷削减的紧急状态。

如果得到的状态是正常状态,当然不会产生负荷削减,如果是一紧急状态,负荷削减就可能存在。对于一个实际的系统可能得到的紧急状态一般是属于情形2)的,这时可以通过一简单的线性直流潮流分析加以判断。一旦判定该状态是属于情形2)的,那这一状态就不会对最后充裕度指标的形成产生任何影响。如果判断出该状态不属于情形2),这时,就必须求解最优负荷削减模型。当得到的解为零时,说明该状态可通过调节机组开停避免负荷削减,该状态属于情形3)。而当求得的解不为零时,说明该状态下必须进行负荷削减了,该状态属于情形4)。应该说对于可靠性充裕度指标的形成,只有情形4)的状态才会产生最后的影响。这里还需要说明的是,文中所讨论的最优负荷削减模型都是采用的线性的直流模型。这对可靠性的计算来说,满足足够精度的同时也保证了足够的计

* 收稿日期:2003-06-10

作者简介:刘洋(1978-),男,重庆永川人,重庆大学硕士,从事电力系统规划和可靠性研究。

算速度。

2 最优负荷削减模型的建立

先由直流潮流方程推导出注入有功与线路有功的线性关系式。

直流潮流方程为：

$$P = B'\delta$$

将其写成：

$$A'P = \delta$$

式中 $A' = (B')^{-1}$ 。

记 a'_i, a'_j 分别为 A' 的第 i 行和第 j 行, 根据线路功率 $P_{ij} = (\delta_i - \delta_j)/x_{ij}$ 和上式得：

$$P_{ij} = \frac{a'_j - a'_i}{x_{ij}} \times P$$

因此线路有功矢量 $T = P_{ij}$ 与线路注入有功矢量有如下关系：

$$T = W \times P$$

其中, T 的元素 P_{ij} 表示从始节点 i 流向终节点 j 的有功功率, 关联矩阵 W 是 $L \times (n - 1)$ 矩阵 (L 为线路数, n 为节点数)。

当采用直流模型, 且不考虑电压约束后, 最优负荷削减实际就成为一个线性规划问题。至此, 可导出基于直流潮流的最优负荷削减模型^[5-6], 目标函数为：

$$\text{Min} \sum_{i \in NC} X_i$$

约束条件包括：

$$PG^{\min} \leq PG \leq PG^{\max}$$

$$0 \leq X_i \leq PD_i \quad (i \in NC)$$

$$\sum_{i \in NG} PG_i + \sum_{i \in NC} X_i = \sum_{i \in NC} PD_i$$

$$T(S^j) = W(S^j)PG + X - PD$$

$$|T(S^j)| \leq T^{\max}$$

这里的 NC 指负荷母线所组成的集合; NG 指发电机母线组成的集合; $T(S^j)$ 是在状态 S^j 下的线路有功功率向量; $W(S^j)$ 则是状态 S^j 下的线路有功功率向量和节点注入功率间的关联矩阵; PG 和 PD 分别是节点的发电机注入有功功率向量和有功负荷向量; PG^{\min} 、 PG^{\max} 和 T^{\max} 分别是 PG 和 $T(S^j)$ 的约束向量; X 是负荷削减向量, 即为该规划问题的决策变量。可见, 该最优解即为满足有功功率平衡, 线性潮流关系, 线路有功约束和节点注入功率约束条件下的最小负荷削减量。

3 考虑临近原则和按重要程度削减原则

在实际的负荷削减中, 通常考虑了以下两个重要的负荷削减原则：

1) 尽量削减相对靠近故障元件母线上的负荷(临近原则)。

2) 负荷削减应考虑到按负荷的重要程度来进行。最不重要的负荷应该最先削减, 然后是次不重要的, 最后万不得已才削减最重要的负荷(按重要程度削减原则)。

这两个实际的削减原则可以在上述最优问题中加入两个加权因子得到实现。方法如下：

在规划模型的目标函数中引入针对临近原则的 β_j 因子和针对重要程度削减原则的 α_i 因子, 从而新的目标函数为：

$$\text{Min} \sum_{i \in NC} (\alpha_i \sum_{j=1}^{DM} \beta_j X_{ij})$$

约束条件：

$$T_i(S^j) = \sum_{k=1}^{NS} [W_{ik}(S^j)(PG_k + \sum_{j=1}^{DM} X_j - PD_k)]$$

(其中 $i = 1, \dots, L$)

$$\sum_{i \in NG} PG_i + \sum_{i \in NC} \sum_{j=1}^{DM} X_{ij} = \sum_{i \in NC} PD_i$$

$$PG^{\min} \leq PG \leq PG^{\max}$$

$$0 \leq X_{ij} \leq \lambda_j PD_j$$

(其中 $i \in NC; j = 1, \dots, DM$)

$$|T(S^j)| \leq T^{\max}$$

这里的 L 和 NS 是总的线路数和母线数。在上面的模型中, 每条母线上的负荷被分为若干个 (DM) 等级, λ_j 为第 j 等级负荷所占该母线总负荷的百分比, β_j 为该母线第 j 等级负荷对应的加权因子, 该等级负荷越重要该值应取得越大。引入该加权因子后, 上面的按重要程度削减负荷就可以求解最优解的时候自动满足。 α_i 是针对每条母线的加权因子, 根据离故障元件的远近先设“度”值: 对某一故障状态, 与故障元件直接关联的母线(除去潮流送端母线) 设为一度, 接着在余下的母线中设置与一度母线直接关联的母线(除去潮流送端母线) 为二度, 如此类推可定义 N 度母线, α_i 值应按度数从大取到小。简单地说, 母线距离故障元件很远时(度值大), α_i 值应取较大值, 否则, 应取较小值。引入该加权因子后, 上面的实际负荷削减的临近原则即可自动满足。

4 可靠性评估程序的编制

作者基于上述的最优负荷削减模型并采用 Monte Carlo 随机抽样产生系统状态的方法编制了针对大电网系统的可靠性评估程序。其流程图如图 1 所示。

其中提前枚举一阶事件的目的在于: Monte Carlo 随机抽样系统状态中, 可能绝大部分(例如 IEEE - RTS24 系统为 83%) 是属于正常状态或者一阶事件状态, 为了节省反复计算同一阶事件所带来的时间浪费, 所以在开始时就预先枚举计算完系统中的一阶事件。

另外, 针对同一母线上不同重要等级负荷的 β_j 加权因子按负荷重要等级由高到低设置, 最低等级负荷

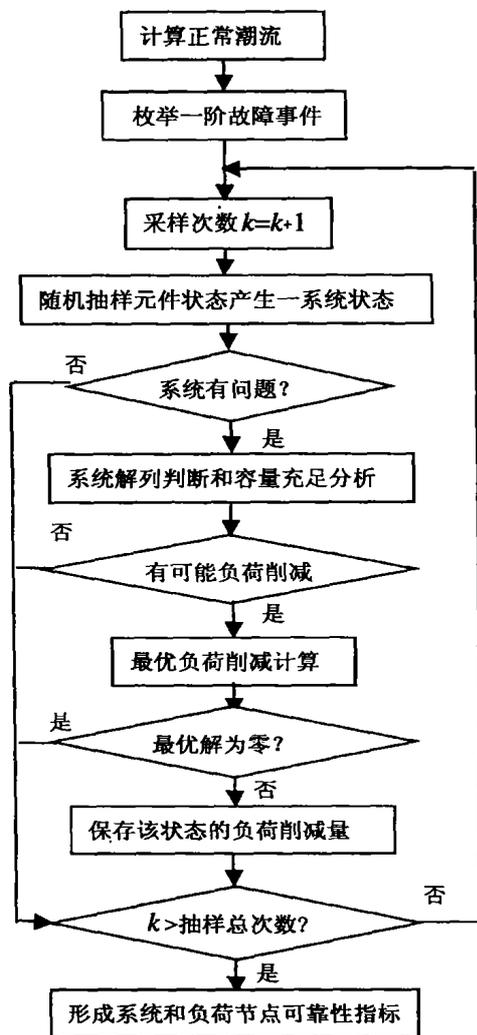


图1 基于最优负荷削减模型的可靠性评估程序流程图

的加权因子设为1,次低级负荷设为 $1 + e$, 然后是 $1 + 2e$, 如此类推。 e 值原则上越大越能满足按负荷重要等级削减的要求, 但通过多个具体算例反复试验发现(计算中均采用标么值): e 值取 0.1 时, 已能达到严格按负荷重要等级削减的要求, 当取值大于 0.1 时, 负荷削减结果与取 0.1 时等同。该值一般不应低于 0.1。由于计算误差的存在, 该值太小时, 部分母线的负荷削减量可能没有完全按照负荷重要等级进行削减。

而针对各条母线为满足临近原则而引入的 α_i 因子, 根据离故障元件的远近先设“度”值。 α_i 的值可按度值的大小每度增加 f 计算(设一度母线对应的加权因子为 1), f 为:

$$f = TL/NTB$$

式中 TL 为系统负荷总量; NTB 为负荷母线数。计算中均采用标么值。

通过多个具体算例反复试验, 采用上式计算得出的 α_i 因子效果较好。该值如果取得太大, 一味满足了临近原则, 但可能失去了最优削减的意义; 取值过小,

满足临近原则的效果就不太明显。

5 算例分析

利用上述程序对 IEEE - RTS24 节点系统^[7] 和 RBTS6 节点系统^[8] 进行了计算。Monte Carlo 抽样次数为 10 000 次, 每条母线上的负荷被缺省设置为 3 个等级, 按重要程度由高到低分别各占 20%, 50%, 30%。

IEEE - RTS24 节点系统是一个 24 节点系统, 该系统有 32 台发电机, 33 条输电线路, 5 台变压器, 17 个负荷点, 装机总容量为 3 405 MW, 系统最大负荷 2 850 MW。系统的电气参数和可靠性参数见参考文献[7]。

利用程序对 IEEE - RTS24 节点系统进行可靠性计算, 在负荷削减中分别考虑最优负荷削减和不考虑最优负荷削减(只采用简单的临近原则)。所得出的系统总指标列于表 1。

表1 IEEE - RTS24 系统总指标

负荷削减方式	LOLP	FLOL /次·a ⁻¹	EDNS/MW	EENS /MW·h·a ⁻¹
考虑最优负荷削减	0.069 48	44.367 51	11.809 32	103 449.6
不考虑最优负荷削减	0.078 67	63.457 83	15.567 82	136 374.3
文献[6]的结果	0.075 30	47.966 53	11.970 45	104 778.1

从表 1 可见, 在负荷削减中分别考虑最优负荷削减和不考虑最优负荷削减所得到的可靠性指标, 失负荷概率 LOLP 和失负荷频率 FLOL 相对比较接近, 而缺电量期望 EENS 和缺电力期望 EDNS 相差最大, 前者明显比后者小, 大约相差 30%。究其原因, 最优负荷削减和不考虑最优负荷削减, 两者的区别只是采用的负荷削减方式不同, 而当发生故障需要进行负荷削减时, 两种方式都会产生负荷削减事件, 故两者的失负荷概率和频率相差不大。而由于两者采用了不同的负荷削减方式, 所以每次负荷削减时的削减负荷绝对量可能就不同。故最后每次累计起来两者所得出缺电量期望就相差很大了。

RBTS6 节点系统是一个 6 节点系统, 该系统有 2 条发电机母线, 4 条负荷母线, 9 条传输线和 11 台发电机。尖峰负荷为 185 MW, 总装机容量 240 MW。系统的电气参数和可靠性参数见参考文献[8]。系统总指标列于表 2。

表2 RBTS6 系统总指标

负荷削减方式	LOLP	FLOL /次·a ⁻¹	EDNS/MW	EENS /MW·h·a ⁻¹
考虑最优负荷削减	0.009 88	4.798 25	0.118 67	1 039.595
不考虑最优负荷削减	0.011 27	5.858 25	0.146 53	1 283.754
文献[6]的结果	0.010 44	5.272 52	0.124 29	1 085.818

各负荷节点可靠性指标列于表 3。

表3 RBTS6 系统节点指标

指标	节点号	本文结果	文献[6]的结果
LOLP	2	0.008 23	0.000 24
	3	0.003 81	0.002 46
	4	0.003 51	0.002 42
	5	0.003 52	0.008 98
	6	0.004 65	0.010 34
	EENS	2	493.670 86
3		158.470 68	228.704 07
4		61.326 24	169.478 39
5		32.614 76	147.462 65
6		293.513 12	533.184 88
EDNS		2	0.056 35
	3	0.018 09	0.026 18
	4	0.007 00	0.019 40
	5	0.003 72	0.016 88
	6	0.033 51	0.061 03

从表2可见, RBTS6 节点系统在负荷削减中考虑最优负荷削减也明显不同于不考虑最优负荷削减所得到的可靠性指标。其中 LOLP 相差较小, 大约 10%; EENS 相差较大, 大约 23%。

从表3可见, 各负荷节点的可靠性指标相对文献[2]的结果有一定出入。出入的焦点在节点2处。节点2在系统中既是发电机节点, 也是负荷节点。其中作为发电机节点共有7台发电机与它相连, 占总装机的60%以上。经过用枚举法统计, 系统中发电机故障造成负荷削减的概率大约是线路故障的15倍。由于笔者在程序中考虑了临近原则, 可以想象, 节点2由于受发电机的影响, 在满足临近原则的情况下, 其失负荷概率应该是非常高的。而文献[6]中应该没有考虑发电机由于临近原则对节点2指标的影响, 所以就产生了如上所述的本文结果和文献[6]的不一致。

6 结论

本文采用最优负荷削减模型计算电网可靠性, 易达到理想的计算精度, 并能真正反映电网能够达到的

真实可靠性水平, 有利于对电网的可靠性水平进行正确合理的评价。并且, 在时间上, 采用 Monte Carlo 法抽样得到的绝大部分系统状态在通过简单的解析分析后是不需要进行任何负荷削减的, 也即是说, 算法中只有少数必须进行负荷削减的紧急状态才需要进行最优负荷削减计算, 而且由于在最优负荷削减模型中采用了线性直流模型, 每次最优负荷削减所需的计算时间也不会太长。所以总的的时间上与采用其它负荷削减策略的可靠性评估算法相比也相差不大。另外, 为了与实际的负荷削减策略保持一致, 本文也在最优负荷削减模型中设置自动满足实际削减策略的加权因子, 从而能够得到实际的母线节点指标。

参考文献:

- [1] BILLINTON R, ALLAN R N. Reliability evaluation of power system[M]. New York: Pitman, 1984.
- [2] GOEL L, BILLINTON R. Pertinent factors in the adequacy evaluation of an overall electric power system[J]. IEE PROC, 1995, 142(4): 319-327.
- [3] 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: 重庆大学电气工程学院, 1999.
- [4] 谢开贵. 基于交流潮流的电力系统可靠性评估模型与算法研究[D]. 重庆: 重庆大学电气工程学院, 2001.
- [5] 李文沅. 大型发输电组合系统可靠性评估的 Monte Carlo 法[J]. 重庆大学学报, 1989, 12(3): 97-102.
- [6] BILLINTON R, LI WENYUAN. Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods[M]. New York: Plenum Press, 1994.
- [7] IEEE COMMITTEE REPORT. IEEE Reliability Test System[J]. IEEE Trans on PAS, 1979, 98: 2 047-2 054.
- [8] BILLINTON R, KUMAR S, CHOWDHURY N. A Reliability Test System for Education Purpose: Basic Data[J]. IEEE Trans on PS, 1989, 4(3): 1 238-1 244.

Optimal Load Curtailment in Bulk Power System Reliability Evaluation

LIU Yang, ZHOU Jia-qi

(College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: This paper studies the question for considering optimal load curtailment in bulk power system adequacy evaluation. A minimization model of load curtailment is utilized for the contingency states which may have load curtailment. In order to calculate realistic bus indexes, two practical load curtailment philosophies are incorporated in the minimization model of load curtailment, which is achieved in computer program developed for bulk power system reliability evaluation. The minimization model of load curtailment, correlated algorithms, and flow chart of program are given in this paper. The effectiveness and availability of the model are verified from two case studies.

Key words: power system reliability evaluation; optimal load curtailment; bulk power system; load curtailment philosophies

(编辑 李胜春)