

可靠性评估中多重故障算法的研究

程 林, 郭永基

(清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘 要: 针对精确地考虑多重故障的影响遇到的“维数灾”困难, 提出了基于元件持续时间抽样方法, 将多重故障评估转换为单重故障评估, 利用存储系统状态和状态评估结果来减少需要评估的系统状态数, 既实现了精确评估多重故障的影响, 计算量增加又不大。在单重故障评估中, 基于灵敏度分析的负荷控制策略, 保证任何系统状态下单重故障潮流计算收敛, 使多重故障能够顺利转换成单重故障计算。通过 IEEE-RTS 算例计算表明, 算法是可信和有效的。

关键词: 可靠性评估; Monte-Carlo 模拟法; 元件状态持续时间抽样; 灵敏度分析; 负荷控制策略

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

文章编号: 1000-0054(2001)03-0069-04

Multiple fault assessment algorithm for reliability evaluation

CHENG Lin, GUO Yongji

(Department of Electrical Engineering,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Multiple faults affect the reliability indices in large power systems. An efficient algorithm is developed for multiple fault assessment based on the component state duration sampling approach (CSDSA), where the multiple faults are transformed into the single fault to accelerate the calculation. Also the sampling state and the load curtailment are recorded to avoid re-evaluating the same system states. The load curtailment strategy based on sensitivity is presented in the single fault assessment. Evaluation of The IEEE-RTS using the algorithm shows that the algorithm is more accurate and efficient.

Key words: reliability evaluation; Monte-Carlo simulation; component state duration sampling; sensitivity; load curtailment strategy

大规模电力系统的多重故障对系统可靠性指标的影响是不容忽略的。IEEE-RTS 测试系统^[1]是包括 71 个元件的中型电力系统, 用解析法计算表明^[1]系统多重故障(3 重及 3 重以上)的概率为 0.165 2, 虽然单个多重故障状态发生的概率很小, 但随着系

统规模的增大, 多重故障的组合数目以指数增加, 因此在大规模电力系统可靠性评估中多重故障状态占有较大比重, 不能将它们忽略。

目前发输电合成系统充裕度评估方法分为两大类: 偶发事故枚举法即解析方法, Monte-Carlo 模拟法即模拟方法, 一般均采用故障筛选技术。如文[1]采用偶发事故枚举法, 文[2]采用基于系统状态抽样方法的 Monte-Carlo 模拟法, 文[3]采用自组织神经网络模型, 但均限定只评估到 4 重或 5 重发电机和 2 重或 3 重线路故障, 忽略更高重数故障。文[4]中引入基于同心松弛概念的启发性思想, 提出通过构造双重故障加速表来近似评估多重故障的影响, 但仍未解决精确评估多重故障影响的问题。

如何精确地考虑多重故障的影响是进行发输电合成系统充裕度评估迫切需要解决的问题。论文结合 Monte-Carlo 模拟法中元件状态持续时间抽样方法, 提出将多重故障评估转换为单重故障评估来简化评估过程, 并利用存储系统状态和状态评估结果来减少需要评估的系统状态数, 以实现精确评估多重故障的影响, 并使计算量增加不大。

1 考虑多重故障的可靠性评估算法

元件状态持续时间抽样法是一种时序 Monte-Carlo 法。假定元件运行时间和故障状态下修复时间服从某种概率分布, 通常电力系统可靠性评估常用指数分布, 然后根据元件的故障率和修复率确定该元件在给定时间段内的状态和状态持续时间。当给定时间段内所有元件的状态和状态持续时间确定后, 就可以获得系统的状态序列和持续时间。抽样原理如图 1 所示, 先通过对 3 个元件(A, B 和 C)的运行和故障状态持续时间模拟, 然后获得系统状态和

收稿日期: 2000-03-07

基金项目: 教育部博士点专项科研基金项目

作者简介: 程林(1973-), 男(汉), 湖南, 博士生。

状态持续时间, 图中给定时间段内总共模拟出 11 个系统状态, 包含 8 个不同系统状态(论文指的相同系统状态指故障元件完全相同的系统状态)。从抽样原理可看出, 系统状态序列中相邻两状态的区别只是单一元件的状态改变(元件故障或元件修复), 因此可以将多重故障评估转换为在前一状态基础上进行单重故障评估(如状态 4 是 3 重故障, 可以在状态 3 的基础上进行元件 C 单重故障评估), 这样可以极大地简化多重故障的评估过程。而且抽样产生的系统状态中包含许多相同系统状态, 可以通过存储系统状态和状态评估结果来减少需要评估的系统状态数, 如图 1 中状态 10 可以直接读取状态 6 的状态评估结果, 不必重新计算。表 1 对 IEEE-RTS 的模拟结果说明, 在总时间 200 万 h 中出现系统状态 113 748 个, 其中不同系统状态 14 943 个, 只占 13.14%, 因此通过存储系统状态和状态评估结果, 可以极大地减少需要评估的系统状态数, 减少计算量, 代价是占用内存, 这就是“以空间换时间”的思想。

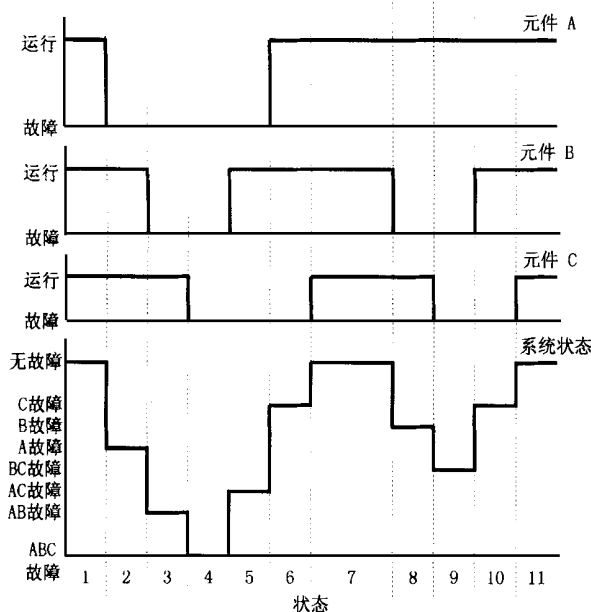


图 1 元件状态持续时间抽样法原理图

发输电合成系统充裕度评估中精确评估多重故障的算法如图 2 所示。

其中几个主要模块有:

单一状态评估模块。出现这种情况的原因在于某一元件恢复运行, 产生的新状态尚未评估, 如图 1 中状态 5 的情况。处理方法是将该状态转换为连续单重故障形成的子状态序列进行评估。例如将状态 5 转换为“无故障- > 元件 A 故障- > 元件 C 故障”包含 3 个子状态的序列, 实际上需要评估的是两

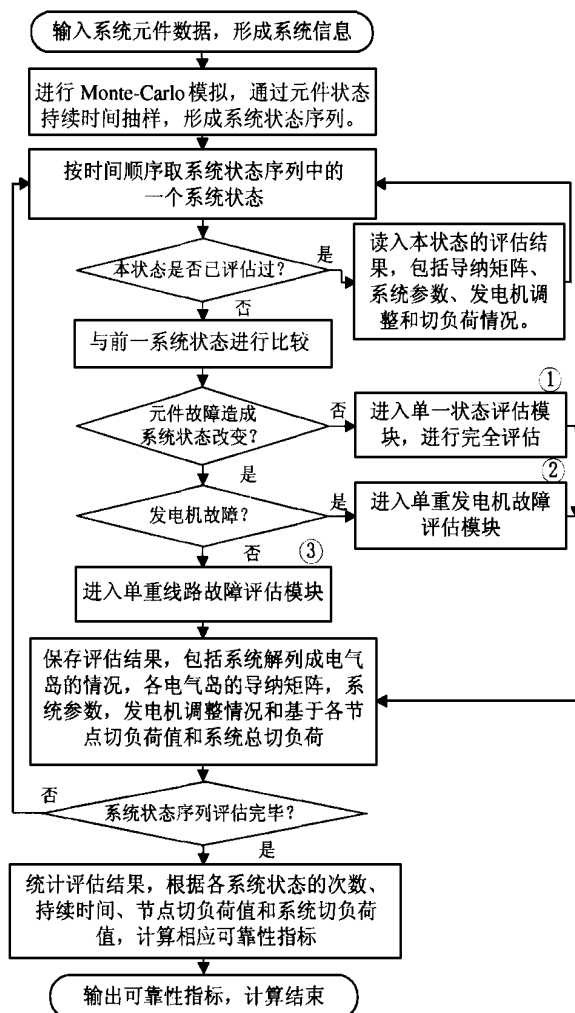


图 2 发输电合成系统充裕度评估算法流程图

次单重故障。

单重发电机故障评估模块。单重发电机故障时, 系统结构没变, 可直接进行潮流计算, 基本步骤如图 3 所示。

单重线路故障评估模块。单重线路故障如果系统没有解列, 可以采用速度较快的补偿法开断潮流计算, 如果造成系统解列, 则需要对所有新形成的电气岛均进行电气岛潮流计算, 基本步骤如图 4 所示。

实现多重故障转换成单重故障进行评估, 并保证评估结果与直接进行多重故障评估一致的前提是, 在任意系统状态下单重故障的潮流计算均收敛且在采取适当的发电机功率调整和切负荷措施后无元件过负荷发生。为了实现这一前提, 论文采取的措施有:

1) 在单重发电机故障, 造成潮流计算发散的原因在于发电机故障引起较大的不平衡功率, 超过了平衡节点的平衡能力。因此发电机故障, 首先需要进

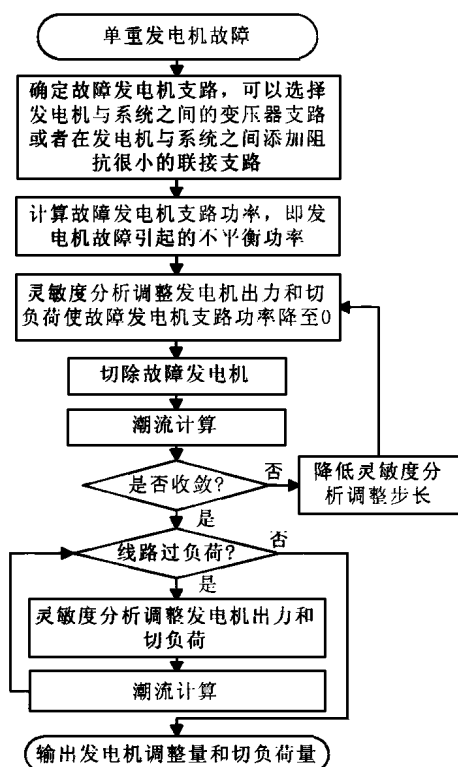


图3 单重发电机故障评估算法流程图

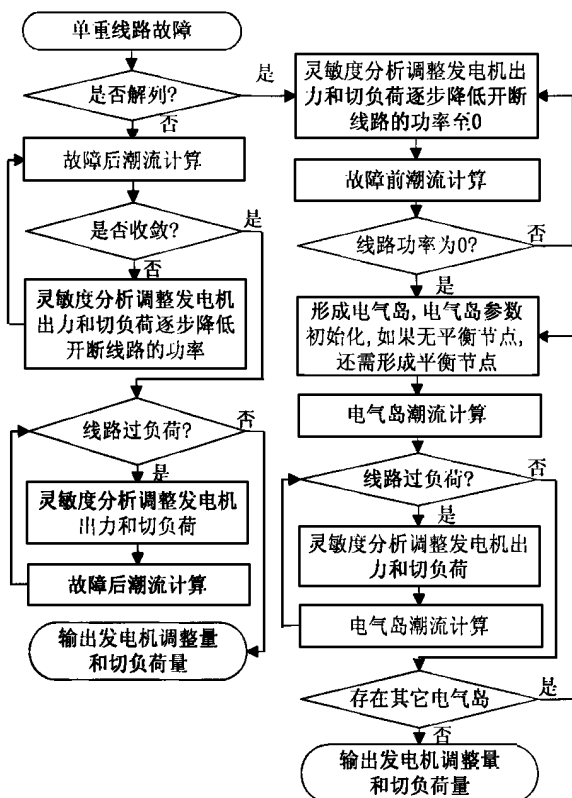


图4 单重线路故障评估算法流程图

的出力也将降至 0, 此时切除故障发电机不会对系统造成大的影响。如果此时潮流计算仍不收敛, 可以降低灵敏度分析调整步长, 分几步将不平衡功率降至 0, 保证每步调整潮流收敛。

2) 单重线路故障中, 如果系统未解列, 但由于开断的线路功率较大, 其传输功率无法全部被转移, 故障后潮流计算可能不收敛。此时采取灵敏度分析调整发电机出力和切负荷逐步降低开断线路的功率, 直到故障后潮流计算收敛。极端的情况开断线路上的功率已经降至 0, 此时移去故障线路不会对系统造成影响。

3) 单重线路故障中, 如果系统发生解列, 为了使电气岛潮流收敛, 首先应该进行不平衡功率调整, 方法是采取灵敏度分析调整发电机出力和切负荷降低开断线路功率至 0, 这样线路故障后电气岛不存在不平衡功率, 潮流计算基本能够收敛。如果经过不平衡功率调整后, 电气岛潮流计算仍不收敛, 原因在于故障前后系统状态偏离过大, 此时可以分几步进行不平衡功率调整, 逐步调整故障前系统状态接近故障后系统状态。

4) 为了使后续单重故障仍能进行, 当系统解列时对所有的电气岛均需进行潮流计算, 且保证其收敛, 并且在存储时按照电气岛状态进行存储。

通过采取以上措施, 原则可以解决任意系统状态下单重故障的潮流计算收敛问题, 通过 IEEE-RTS 算例, 表明所有评估的系统状态均保证收敛。

2 算例分析

根据论文提出的算法, 对 IEEE-RTS 系统进行了评估, IEEE-RTS 为 24 母线, 71 个元件的系统。

对 IEEE-RTS 进行可靠性充裕度评估的结果比较如表 1 所示, 其中 A 和 B 是论文的计算结果, C 是 R. Billinton 等人的计算结果^[2]。评估结果表明, 虽然采取了不同的评估算法, 论文的计算结果与 R. Billinton 等人的计算结果基本一致。由于 C 列已经考虑了 3 重线路故障和 5 重发电机故障, 所评估的系统状态概率已经大于 0.997, 所以评估结果相差不大。但由于多重故障往往造成更严重的后果, 即使概率很小, 也需要在可靠性评估中予以考虑, 表 2 的评估结果说明, 由于 C 列是采用解析法进行计算, 采用了故障筛选技术, 忽略了部分多重故障影响, 可靠性指标偏小, 结论偏乐观, A 列比 B 列的 BPII 指标大 7.7%。由于 Monte-Carlo 模拟法自身的特点, 对于发生概率很小的多重故障, 需要较长的

行不平衡功率的调整。为了使发电机功率调整和切负荷更为合理, 采用了灵敏度分析方法, 而不是就近调整。当故障发电机支路功率降至 0 时, 故障发电机

模拟时间才可能发生,因此模拟时间越长,考虑的多重故障状态数越多,获得的可靠性指标越接近实际系统运行。如表2中A列模拟40万h,B列模拟200万h,而B列的可靠性指标比A列大5%~9%,说明多重故障的影响是不能低估的。

表1 IEEE-RTS 可靠性评估结果比较

系统量	A 列	B 列	C 列
切负荷频率/(次·a ⁻¹)	21 53	22 68	54 22 [*]
切负荷持续时间/(h·a ⁻¹)	819 75	872 79	711 29
切负荷概率	0 093 6	0 099 6	0 081 4
能量切除值 EENS /(GW·h·a ⁻¹)	120 10	132 05	120 21
供电中断指数BPII /(MW·(MW·a) ⁻¹)	3 466	3 650	3 218
能量切除指数BPECI /(MW·h·(MW·a) ⁻¹)	42 14	46 33	42 18
系统分SI/min	2 528 5	2 780 1	2 530 7
计算时间 t/min	4 93	19 97	53 30

注:表中计算条件:
A和B是论文的计算结果,基于元件状态持续时间抽样的Monte-Carlo模拟法;交流潮流计算;基于直流潮流的灵敏度分析的负荷控制策略;计算环境是微机PII400,Windows NT;其中A模拟时间段40万h,B模拟时间段200万h。
C是R. Billinton等人的计算结果^[2],采用偶发事故枚举法,线路故障计算到3重,发电机故障计算到5重;交流潮流计算;基于直流潮流的优化方法计算切负荷;计算环境是小型机VAX-6330。
*:偶发事故枚举法计算确切系统切负荷频率比较困难,因此文[2]采用系统切负荷次数(ENLC)来近似计算系统切负荷频率(EFLC)。而基于元件持续时间抽样的模拟法的特点之一是能够计算系统确切频率,这是论文与文[2]计算的频率指标有差别的原因。

从计算时间来看,虽然不具备可比的计算环境,但论文的算法速度是有优势的。模拟时间段40万h,实际需要评估的不同系统状态为4 835个,模拟时间段200万h,实际需要评估的不同系统状态为14 943个,远远少于解析法需要评估的系统状

态数(3重以内系统状态数59 711个),更重要的是可以转换为单重故障以加速计算。由于采取了存储系统状态和评估结果的技术,如果对同一系统进行多次评估,计算速度更快,如进行第二次评估,模拟时间段40万h,计算时间8s;模拟时间段200万h,计算时间为67s。

3 结 论

在基于“以空间换时间”思想上,提出利用存储系统状态和状态评估结果来减少需要评估的系统状态数以加速可靠性评估过程,结合Monte-Carlo模拟法中元件状态持续时间抽样方法,将多重故障评估转换为单重故障评估来简化评估过程,既实现了精确评估多重故障的影响,又使计算量增加不大。

基于灵敏度分析的负荷控制策略,提出了保证任何系统状态下单重故障潮流计算收敛的措施,使多重故障能够顺利转换成单重故障计算。

通过IEEE-RTS算例表明,算法在精确评估多重故障影响并保持较快计算速度方面具有优势。

参考文献 (References)

[1] Billinton R, Allan R N. Reliability Assessment of Large Electric Power Systems [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1988

[2] Billinton R, Wenyuan Li. Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods [M]. New York: Plenum Press, 1994

[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, 1999

WU Kaigui. The Study of Intelligent Model and Algorithm in Power System Reliability Assessment [D]. Chongqing: Chongqing University, 1999 (in Chinese)

[4] GUO Yongji, XIAO Kai, XI Yongjian, et al. Composite system reliability evaluation based on Monte-Carlo simulation combined with outages screening [J]. IEEE Trans on PWRs, 1999, 14(2): 785 ~ 790