

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.03.021

计及检修的电网可靠性评估的马尔可夫方法^{*}

裴星宇¹, 唐磊², 黄怀辉¹, 周小艺¹, 文福拴^{2,3}, 李伟华⁴, 刘新东⁴

(1. 广东电网有限责任公司 珠海供电局, 广东 珠海 519000; 2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027;
3. 文莱科技大学 电机与电子工程系, 文莱 斯里巴加湾 BE1410; 4. 暨南大学 电气信息学院, 广东 珠海 519070)

摘要:针对电力系统状态检修和可靠性评估问题,对采用状态检修的电力系统可靠性评估进行了研究,提出了一种计及状态检修的电网可靠性评估方法。将影响电力系统可靠性的因素归纳为3个方面:外力破坏、设备老化、设备检修。将电力系统设备状态的变化视为无后效性的马尔可夫过程,将设备状态划分为5个等级,考虑外力破坏、设备老化、设备检修三方面的影响,分别建立无检修和有检修情况下设备的状态转移模型。在此基础上,采用蒙特卡洛仿真算法对系统进行了可靠性评估,计算常用的系统可靠性指标之一即期望缺供电量。研究结果表明,设备质量和其工作环境对系统可靠性具有明显影响,这样应首先考虑通过改善设备质量和工作环境来提升系统可靠性。

关键词:电力系统;可靠性评估;状态检修;马尔可夫过程;蒙特卡罗仿真

中图分类号:TM726

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)03-0357-04

Markov process based reliability evaluation method in power systems considering condition based maintenance

PEI Xing-yu¹, TANG Lei², HUANG Huai-hui¹, Zhou Xiao-yi¹,
WEN Fu-shuan^{2,3}, LI Wei-hua⁴, LIU Xin-dong⁴

(1. Zhuhai Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Corporation, Zhuhai 519000, China;

2. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. Department of Electrical and Electronic Engineering, Institut Teknologi Brunei, Bandar Seri Begawan BE1410, Brunei;

4. School of Electrical and Information Engineering, Jinan University, Zhuhai 519070, China)

Abstract: Aiming at condition-based maintenance and reliability evaluation of power system, a Markov process based reliability evaluation method considering condition based maintenance was proposed. The impacting factors on power system reliability was divided into three kinds: outside destroying, aging of equipment and equipment maintenance. With these impacting factors considered, the changes of power equipment states were described as a non-aftereffect Markov process with five equipment state levels included. The equipment state transition models were respectively established next for the scenarios with and without maintenance. Then, the system reliability was evaluated using the well-established Monte Carlo simulation method and one of the widely used reliability indices, i. e. expected energy not supplied (EENS) was calculated. The results indicate that the equipment quality and work environment have significant impacts on the system reliability. Hence, improving equipment quality and work environment is the first option to enhance the system reliability.

Key words: power system; reliability evaluation; condition-based maintenance; Markov process; Monte Carlo simulation

收稿日期:2015-11-23

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2015AA050202);国家自然科学基金资助项目(51477151,51361130);中国南方电网有限责任公司科技项目(K-GD2014-065)

作者简介:裴星宇(1982-),男,贵州贵阳人,工程师,主要从事电力系统运行与控制方面研究工作。E-mail:superpei119@139.com

0 引言

电力系统可靠性是指电力系统向用户持续供电的能力。国内外对电力系统可靠性的研究由来已久,从总体上可分为3个阶段:确定性评估、概率评估和风险评估^[1]。确定性评估方法采用较为保守的预想事故校验方法,如“N-1”校验,最终得到的系统安全运行点通常具有较大的安全裕度。概率评估方法考虑了事故发生概率,但未考虑其经济损失,无法全面考虑事故导致的综合影响。风险评估方法统筹考虑了事故可能导致的经济损失与事故发生概率,将风险与效益联系起来,能够定量反映系统的经济与安全指标^[2]。

影响电力系统可靠性造成停电事故的原因主要包括:①不可抗拒的外力破坏;②设备的自然老化;③设备检修导致的停运。

不可抗拒的外力破坏主要指恶劣的气候环境条件造成设备故障。设备的自然老化是指,电力系统设备随着使用时间的增加,故障率会逐渐增加,导致电力系统故障事故的发生。电力系统的设备检修可能造成设备停运,改变电力系统的运行方式,影响电力系统的供电可靠性。电力系统检修方式的主要经历了4个阶段^[3-8],分别为:事后检修、预防性定期检修、状态检修、以可靠性为中心的检修,本研究主要考虑状态检修对系统可靠性的影响。

在不考虑设备状态对后续状态的影响的情况下,上述三方面的影响因素均可视为马尔可夫过程。本研究考虑电力系统可靠性三方面的影响因素,基于马尔可夫过程,提出了电力系统可靠性评估的一种概率方法。

1 基于马尔可夫过程的设备状态转移模型

电力系统设备随着使用时间的增加,会出现设备老化现象,导致电力系统故障事故的发生;不可抗拒的外力破坏具有很强的随机性,针对某一个设备发生外力破坏的概率又非常小。本研究假设电力设备的老化和外力破坏过程,等效为一个无后效性(马尔可夫性)的随机过程,采用马尔可夫过程来模拟电力设备的老化和外力破坏的发生。马尔可夫过程是一种随机过程,该过程具有无后效性的特征,即:若过程 t_0 时刻的状态为已知,则过程在 $t > t_0$ 的状态分布,与过程在 $t < t_0$ 的状态无关。

根据IEEE标准导则^[9],电力设备的运行状态通常划分为4类,分别为正常状态(normal condition),注意状态(attentive condition),异常状态(abnormal condition)和严重状态(serious condition),各级的运行工况逐级恶化。除了上述4类运行状态之外,电力设备还

可能处于故障状态,因此本文将电力设备的状态分为5类,分别为 s_1 、 s_2 、 s_3 、 s_4 、 s_5 ,其中 $s_1 \sim s_4$ 分别对应4种运行状态:正常状态、注意状态、异常状态和严重状态; s_5 对应电力设备的故障状态。

1.1 无检修情况下设备的状态转移图

电力设备的老化和外力破坏的发生是一个随机过程,存在许多不确定因素。例如,同类型的设备在相同工作环境下却可能处于不同的老化状态;在没有检修的情况下,设备会自然老化,设备状态从正常状态 s_1 逐级恶化至故障状态 s_5 ;由于随机的外力破坏,设备有可能从某一运行状态下越级恶化至另一运行状态甚至故障状态。综上所述,在没有检修的情况下,设备状态的变化是一个状态概率转移过程,该过程具有无后效性,即下一时刻设备所处的状态仅与现在时刻的状态有关。无检修情况时的设备状态转移图如图1所示。

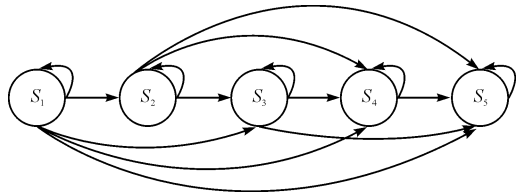


图1 无检修情况时设备状态转移图

1.2 状态检修情况下设备的状态转移图

状态检修往往是根据设备自身状况,依据一定的阈值决策其检修时机^[10-11]。现代电力系统装设有状态监测系统,以监测设备的运行状态。当设备老化至某一程度时,状态监测系统会将设备的老化信息反馈回决策中心,决策中心作出是否检修该设备的决定:当设备处于正常状态 s_1 和注意状态 s_2 时,均可正常运行,此时不需要采取检修手段;但当监测到设备处于异常状态 s_3 或严重状态 s_4 时,需要采取检修手段,以防止设备发生故障;当设备处于故障状态 s_5 时,必须采取检修手段。需要指出的是,检修后设备所处的状态也具有一定的随机性,例如,同类型的设备经过同样的检修操作后老化恢复程度可能不同。综上所述,状态检修后设备状态的变化过程也是一个具有马尔可夫性的状态概率转移过程,即下一时刻设备所处的状态仅与现在时刻的状态有关。状态检修时设备状态转移图如图2所示。

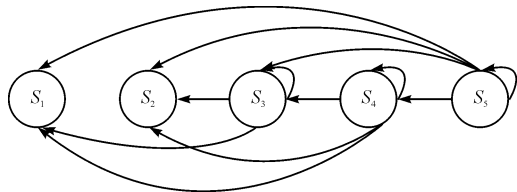


图2 状态检修时设备状态转移图

1.3 设备状态转移模型

设无检修和状态检修情况下,设备由状态 s_i 变为 s_j 的概率分别为 p_{ij} 和 q_{ij} , 将所有的 p_{ij} 或 q_{ij} 用矩阵形式表示为 P 或 Q , P 和 Q 分别为无检修和状态检修情况下设备的马尔可夫状态转移矩阵。由图 1 和图 2 可知, 无检修状态下设备的马尔可夫状态转移矩阵 P 为 5×5 的上三角矩阵, 状态检修时设备的马尔可夫状态转移矩阵 Q 为 5×5 的下三角矩阵。

P 和 Q 矩阵中的状态转移概率可以通过对实际电力设备的状态检测, 进行数据统计得到[12]。例如, 选定 n 个无检修情况的设备对其进行状态检测, 每个设备的反馈数据为 m 维, 那么总共可以得到 $n \times m$ 个状态数据。在这些反馈数据中, 设处于 s_1 (正常状态) 的有 n_1 个, 由状态 s_1 转为状态 s_2 (注意状态) 的有 n_{12} 个, 那么在正常状态下, 设备由 s_1 到 s_2 的状态转移概率 p_{12} (q_{12}) 可以用 n_{12}/n_1 代替。其他状态转移概率也可以通过类似的方法得到, 状态数据越多, 得到的转移概率越接近真实值。

设备 i 在时刻 t 的状态用状态矩阵 $S_i(t)$ 表示。 $S_i(t)$ 是 1×5 矩阵, 其中 $S_i(t)$ 的第 j 列表示设备 i 在时刻 t 处于状态 s_j 的概率。例如, 已知设备 i 在现在时刻 t_0 处于异常状态 s_3 , 那么其状态矩阵 $S_i(t_0) = [0, 0, 1, 0, 0]$ 。如果设备 i 在时刻 t_0 没有采取检修措施, 那么设备 i 在 $t_0 + 1$ 时刻的状态矩阵 $S_i(t_0 + 1) = S_i(t_0)P$; 如果设备 i 在时刻 t_0 进行了检修, 那么设备 i 在 $t_0 + 1$ 时刻的状态矩阵 $S_i(t_0 + 1) = S_i(t_0)Q$ 。 $S_i(t_0 + 1)$ 的 5 列元素分别表示状态检修后, 该设备处于 5 种状态的概率, 此时可以基于概率分析预测出该时刻设备所处的状态。

2 基于蒙特卡洛法的系统可靠性评估

基于无检修和检修情况下设备的马尔可夫状态转移模型, 设备状态会随着时间的变化, 相应的系统状态也会随时间变化。这种情况下, 需要在一个周期时间段, 充分考虑设备自然老化和状态检修的影响, 对系统可靠性进行评估。本研究采用蒙特卡洛仿真方法, 考虑设备老化和状态检修两个影响因素, 对系统状态进行时序模拟, 根据概率统计理论对系统建立参考状态序列, 并对每一个系统状态进行潮流计算, 得到每个系统状态下的可靠性指标值, 最后通过概率统计方法得到系统的可靠性指标。系统的可靠性指标有多种, 如系统平均停电频率、平均停电持续时间、平均供电可用率等, 本研究选取期望缺供电量 EENS 作为可靠性评价指标。

采用蒙特卡洛仿真方法, 对系统进行可靠性评估的具体流程如图 3 所示。

如图 3 所示, T —可靠性评估所考虑的时间周期, 在整个时间周期 T 内, 按照时间顺序依次确定设备的

状态、系统的状态、下一时刻的设备状态和系统状态, 最终建立系统的序列状态, 通过概率统计方法计算得到系统的可靠性指标 EENS。

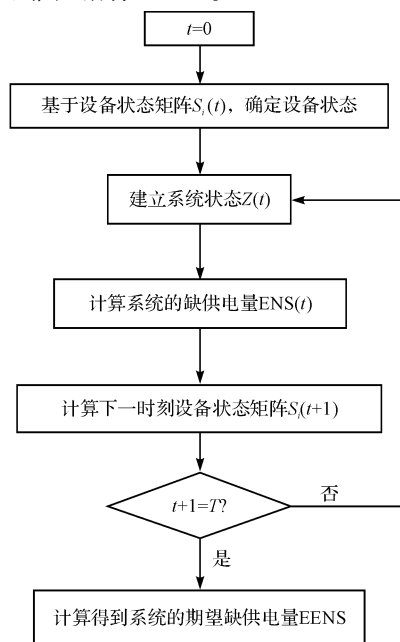


图 3 基于蒙特卡洛的可靠性评估流程图

3 算例分析

将前文提出的可靠性评估方法应用于 IEEE 6 节点系统, 如图 4 所示。IEEE 6 节点系统图该系统有 6 个节点, 9 条线路 (每条线路两端均有断路器), 总负荷为 165 MW。

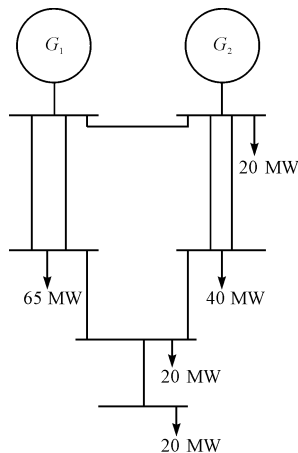


图 4 IEEE 6 节点系统图

在一年的时间周期中 ($T = 365$), 假设断路器和线路的检修周期 t_M 都是 1 天, 无检修情况和检修情况下设备的状态转移矩阵 P 和 Q 分别如式 (1) 和式 (2) 所示:

$$P = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.1 & 0.05 & 0.025 & 0.025 \\ 0 & 0.75 & 0.15 & 0.075 & 0.025 \\ 0 & 0 & 0.7 & 0.2 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.65 & 0.35 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.95 & 0.05 & 0 & 0 & 0 \\ 0.9 & 0.075 & 0.025 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.1 & 0.075 & 0.025 & 0 \\ 0.75 & 0.125 & 0.075 & 0.025 & 0.025 \end{bmatrix} \quad (2)$$

考虑到设备质量的差异和工作环境的不同,设备有可能出现老化过快或者故障率严重的问题,设备更容易由较好的状态转移至更差的状态,设备状态转移矩阵 P_1 如式(3)所示;考虑到状态检修技术手段等问题,状态检修的效果也会有所差异,技术手段落后的状态检修会降低设备恢复正常工作状态的概率,设备状态转移矩阵 Q_1 如式(4)所示:

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0.75 & 0.1 & 0.075 & 0.05 & 0.025 \\ 0 & 0.65 & 0.2 & 0.1 & 0.05 \\ 0 & 0 & 0.6 & 0.3 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.55 & 0.45 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.9 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.15 & 0.05 & 0 & 0 \\ 0.75 & 0.1 & 0.1 & 0.05 & 0 \\ 0.7 & 0.1 & 0.1 & 0.05 & 0.05 \end{bmatrix} \quad (4)$$

考虑 IEEE 6 节点系统中设备(断路器和线路)的自然老化和状态检修,基于设备状态转移模型和蒙特卡洛仿真法,可以得到系统的期望缺供电量 EENS 如表 1 所示。

表 1 IEEE 6 节点系统在不同情况的可靠性评估结果

序号	无检修情况下 设备转移矩阵	有检修情况下 设备转移矩阵	期望供缺电量 EENS/MW
1	P	Q	13.56
2	P	Q_1	14.35
3	P_1	Q	16.47
4	P_1	Q_1	19.57

表 1 列出了 4 种组合情况下系统的期望供缺电量。第 1 种组合下,系统的可靠性最高。第 2 种和第 3 种组合,相比于第 1 种组合,系统的可靠性有所降低,说明较差的设备条件和较差的检修条件都会导致系统可靠性降低。第 4 种组合下系统的可靠性最低。第 2 种组合和第 3 种组合对比,第 3 种组合的期望供缺电量更大,可靠性更低,说明在此算例中,较差的设备条件对可靠性的影响更高,提升可靠性应首先提高设备的质量,改善设备工作环境。

4 结束语

本研究将电力系统设备状态的变化视为无后效性

的马尔可夫过程,将设备状态划分为 5 个等级,考虑外力破坏、设备老化、设备检修三方面的影响,分别建立无检修情况下设备的状态转移矩阵和检修情况下设备的状态转移矩阵。在此基础上,本研究通过蒙特卡洛仿真算法,对 IEEE 6 节点系统进行可靠性评估。通过仿真结果发现,设备质量和工作环境对系统可靠性的影响更大,提升可靠性应首先改善设备的质量和工作环境。

参考文献(References):

[1] 鲍晓慧,侯慧.电力系统可靠性评估述评[J].武汉大学学报:工学版,2008,41(4):96-101.

[2] BILLINTON R, LI W. A Monte Carlo method for multi-area generation system reliability assessment[J]. **IEEE Trans on Power Systems**,1992,7(4):1487-1492.

[3] 谢昶.电网检修计划优化编制方法研究及应用[D].北京:华北电力大学电气与电子工程学院,2013.

[4] 洪思远.计及经济性和可靠性的配电设备检修计划优化研究[D].广州:华南理工大学电力学院,2013.

[5] 黄立新.智能电网条件下输电检修优化模式与实施方案研究[D].北京:华北电力大学电气与电子工程学院,2013.

[6] 高磊.配电网检修计划的优化研究[D].北京:华北电力大学电气与电子工程学院,2010.

[7] 许旭锋.基于不确定理论的供电设备检修问题研究[D].杭州:浙江大学电气工程学院,2009.

[8] 黄弦超.配电网检修计划优化问题的研究[D].北京:华北电力大学电气与电子工程学院,2007.

[9] IEEE Standard C57.104TM-2008, IEEE guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers[S]. New York: Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc, 2008.

[10] MARSEGUERRA M, ZIO E, PODOFILLINI L. Condition-based maintenance optimization by means of genetic algorithms and Monte Carlo simulation[J]. **Reliability Engineering & System Safety**,2002,77(2):151-165.

[11] 袁志坚,孙才新,李剑,等.基于模糊多属性群决策的变压器状态维修策略研究[J].电力系统自动化,2004,28(11):66-70.

[12] Anders G J, Endrenyi J, Ford G L, et al. A probabilistic model for evaluating the remaining life of evaluating the remaining life of electrical insulation in rotating machines[J]. **IEEE Trans on Energy Conversion**,1990,5(4):761-767.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式: