

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190956

电网安全稳定控制系统可靠性评估

彭云豪^{1,2}, 董希建^{1,3}, 周海强², 夏海峰¹, 颜云松¹, 李明应¹, 刘强¹

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 3. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏 南京 211106)

摘要: 对电网安全稳定控制系统(简称稳控系统)的可靠性进行评估是开展其可靠性设计的必要前提, 对于保障电网安全稳定运行具有重要意义。首先, 综述了电网二次系统可靠性评估指标和可靠性评估方法的研究现状, 将可靠性评估指标从时间和概率两个方面进行了归类, 总结了四种可以研究稳控系统可靠性的分析方法。然后, 分别采用马尔可夫状态空间法和蒙特卡罗方法对稳控系统典型工程应用案例进行可靠性计算评估, 比较了两种方法在小型稳控系统可靠性分析中的适用性, 推导出装置失效率和修复率与系统可用度的数学表达式。最后, 通过对比分析前述两种可靠性分析方法的优缺点, 提出综合应用各种可靠性分析方法进一步深化研究大型复杂结构稳控系统可靠性的建议。

关键词: 安全稳定控制系统(稳控系统); 可靠性; 评估指标; 马尔可夫; 蒙特卡罗

Reliability evaluation of power grid security and stability control system

PENG Yunhao^{1,2}, DONG Xijian^{1,3}, ZHOU Haiqiang², XIA Haifeng¹, YAN Yunsong¹, LI Mingying¹, LIU Qiang¹

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

3. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, China)

Abstract: Evaluating the reliability of a power grid Security and Stability Control System (SSCS) is a necessary prerequisite for its reliability design, and is of great significance for ensuring the safety and stability of the power grid. First, the research status of reliability evaluation indices and reliability evaluation methods for the secondary system of a power grid are reviewed. The reliability evaluation indices are examined from aspects of time and probability. Four analysis methods which can be used to study the reliability of SSCS are summarized. Then, the Markov state space and Monte Carlo methods are used to evaluate the reliability of a typical engineering application of an SSCS. The applicability of the two methods in reliability analysis of small-scale SSCS is compared, and the mathematical expressions of failure rate, repair rate and system availability are derived. Finally, through the comparison of the advantages and disadvantages of the above two reliability analysis methods, suggestions are made for the further study of the reliability of large-scale complex SSCSs using various reliability analysis methods comprehensively.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5100-201940006A-0-0-00) "Research on Intrinsic Safety Improvement Technology of Security and Stability Control System for AC/DC Power Grid".

Key words: security and stability control system (SSCS); reliability; evaluation indices; Markov; Monte Carlo

0 引言

随着社会经济的飞速发展, 我国电网建设的步

伐日益加快。本世纪头十年, 1 000 kV 长-南-荆交流工程和±800 kV 复奉直流工程相继投运, 标志着我国已步入区域电网大容量特高压交直流互联新时代, 对电网安全稳定运行的要求空前提高^[1]。电力系统作为一个地域分布广泛的庞大系统, 具有元件众多、结构复杂、动态响应速度快的特点, 任一元件故障都可能造成波及全网的扰动^[2]。尤其是在“强

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(5100-201940006A-0-0-00)“交直流电网安全稳定控制系统本质安全提升技术研究”

直弱交”的电网结构下^[3],直流故障将对电网造成巨大的冲击。因此,为保证电网的安全稳定运行,不仅应强化现有网架结构,还需配置具有快速故障响应特性的健全可靠的防御系统^[4]。

在中国,电网安全稳定控制系统(简称稳控系统)是保障电网安全稳定运行的第二道防线的重要设施^[5]。在“强直弱交”电网过渡期,我国陆续开展了多项特高压交直流电网稳定控制的工程实践,如多直流馈入受端电网频率紧急协调控制系统^[6]、水电汇集多直流弱送端电网系统保护^[7-8]等分区电网稳定控制系统。目前,稳控系统呈现出大型化、广域化和复杂化发展趋势。当电网受到严重故障冲击时,稳控系统的可靠及时动作是保障电网安全稳定运行的重要前提,稳控系统可靠性降低导致的误动、拒动将给电网带来难以承受的二次冲击。历史上,与稳控系统失效有关的电网事故不在少数^[9-10],例如,2006年华中电网“7·1”停电事故^[11],2011年美国“9·8”大停电事故^[12],2018年巴西“3·21”大停电事故^[13],定值整定不当、系统逻辑设计未合理考虑极端严重事件、装置软硬件故障等是引起大停电的主要原因。因此,保障稳控系统可靠发挥作用已成为不容忽视的重要课题,非常有必要开展稳控系统可靠性的研究和实践。

稳控系统的可靠性是指其按照预定时间及预定工况完成规定功能的能力^[14]。目前,稳控系统的可靠性研究尚处于起步阶段,主要是针对单一元件、装置硬件、单站系统或小型系统^[15-16]的可靠性分析,分析研究方法单一,缺乏适应大型稳控系统可靠性研究的一般性方法。

本文首先结合国内外继电保护可靠性^[17-23]已相当成熟的研究现状,研究提出适用于稳控系统的可靠性评估指标和四种可靠性计算分析方法;然后,结合稳控系统的具体工程应用案例,利用前述方法进行了可靠性分析,并比较了不同分析方法在可靠性评估过程中的差异性和优缺点;最后,对稳控系统可靠性评估的进一步研究方向提出建议。

1 稳控系统可靠性评估指标

选取合适的指标对于稳控系统可靠性的定量评估具有重要意义。可将用于稳控系统可靠性评估的指标分成时间型指标和概率型指标两类。

1.1 时间型指标

时间型指标通常用以评估稳控装置或稳控系统的连续运行能力及失效后的修复能力,主要包括平均失效前时间(Mean Time to Failure, MTTF)、平均首次失效前时间(Mean Time to First Failure, MTTF)、平

均修复时间(Mean Time to Repair, MTTR)等。

MTTF表示稳控装置或稳控系统运行过程中不发生故障的平均时间;MTTFF表示稳控装置或稳控系统从初次投运到首次发生故障的平均时间^[24]。对于不可修复系统来说,MTTF与MTTFF的值是相同的;而对于可修复系统来说,当存在多种运行状态时,MTTF与MTTFF是不同的^[25]。MTTR表示稳控装置或稳控系统在发生故障后被修复所需的平均时间。

以上时间型指标不仅能够直观反映出装置或系统的长期运行可靠性水平,也能够体现稳控装置或系统的可修复特性。

1.2 概率型指标

概率型指标通常用以评估稳控装置或稳控系统在运行过程中处于某种状态或发生某种失效的可能性,主要有失效率、修复率、可用度及要求时失效概率。

1) 失效率

失效率(Failure Rate)是进行可靠性评估的基础性指标,其定义为元件运行到 t 时刻尚未失效,之后单位时间内发生失效的概率^[26],通常用 λ 表示。根据稳控装置的失效状态,可以分为误动失效和拒动失效,相应误动失效率 λ_w 和拒动失效率 λ_j 的计算公式为

$$\lambda_w(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P[t < T_w \leq t + \Delta t | T_w > t] \quad (1)$$

$$\lambda_j(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P[t < T_j \leq t + \Delta t | T_j > t] \quad (2)$$

式中: T_w 、 T_j 分别表示元件发生误动失效和拒动失效的时刻。

由于稳控装置包含启动、检测、决策和执行等功能互不相同的模块^[27],每个模块又由不同的硬件和软件部分构成,因此要计算装置的失效率,必须考虑各组件在装置中的重要程度^[28]。假设稳控装置由 k 个模块构成,各模块具有相同的重要程度,则装置失效率 λ_M 的计算公式^[29]可以表示为

$$\lambda_{bi} = \sum_{i=1}^m \alpha_{hi} \lambda_{hi} + \sum_{i=1}^n \alpha_{si} \lambda_{si} \quad (3)$$

$$\lambda_M = \lambda_w + \lambda_j = \sum_{i=1}^k \lambda_{bi} \quad (4)$$

式中: λ_{bi} 、 λ_{hi} 、 λ_{si} 分别表示各模块、组成相应模块的硬件部分与软件部分的失效率; α_{hi} 、 α_{si} 分别表示组成模块的各硬件和软件部分对于该模块的重要程度系数; m 、 n 分别表示构成某模块的软硬件数量。

2) 修复率

修复率(Repair Rate)是指 t 时刻处于失效状态的元件, 在之后单位时间内被修复的概率^[30], 通常用 μ 表示。

$$\mu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P[t < T \leq t + \Delta t | T > t] \quad (5)$$

式中: T 为元件被修复的时刻。

3) 可用度

可用度(Availability, A)是用来表征稳控装置或稳控系统处于正常运行状态的长期状态概率^[31]。由于稳控装置或稳控系统总是处于运行或者修复状态, 因此可用度可由式(6)计算。

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (6)$$

4) 要求时失效概率

要求时失效概率(Probability of Failure on Demand, PFD)表示系统运行时发生危险失效的概率^[32]。国外学者借鉴安全仪表系统可靠性评估的相关经验, 将 PFD 作为衡量特殊保护系统(Special Protection System, SPS)可靠性的标准^[33]。文献[34]在 PFD 的基础上, 建议采用安全完整性等级(Safety Integrity Level, SIL)作为系统完整性保护方案(System Integrity Protection Schemes, SIPS)的可靠性评估指标。SIL 根据 PFD 的数量级, 将系统可靠性由低到高分四个等级, 等级越高, 系统出现故障的概率越低。选取 SIL 为评估指标, 有助于求取特定可靠性等级下系统各部分 PFD 上限, 对于稳控系统的设计和配置具有指导意义。

上述可靠性指标可以从时间、概率等不同侧面描述稳控系统的可靠性, 对于深入研究稳控系统的可靠性具有重要意义。在实施稳控系统工程时, 应根据实际需要针对性地选取可靠性评估指标, 指导稳控系统的可靠性设计。

2 稳控系统可靠性评估方法

可靠性评估指标的求取依赖于可靠性模型的建立。稳控系统可靠性建模一般可以采取解析法和模拟法两种。解析法结合稳控系统的控制架构, 并计及稳控装置之间以及装置与系统之间的逻辑关系, 进行可靠性评估计算, 包括可靠性框图法^[33,35-36]、故障树分析法^[37-39]和马尔可夫模型法^[38-39]等; 模拟法通过对稳控系统的各状态随机采样, 逐一进行确定性分析, 统计出特定状态的概率分布^[40], 蒙特卡罗法^[29]是典型的模拟法。

2.1 可靠性框图法

利用可靠性框图法, 可以将稳控系统以图形化的形式等效为一个框图网络, 其中每个方框都代表

系统中某个特定的组件, 各方框之间将通过串联、并联或组合的方式进行连接。在进行可靠性分析时, 如果能从框图网络中找到一条从始至终的连通路径, 则该路径所经过的组件就足以保证系统的正常运行^[33]。

可靠性框图建模过程中的关键步骤是将物理系统转化为网络模型。通过网络模型能够对系统正常运行和故障运行有较好的定性理解。但是可靠性框图的建立过度依赖于稳控系统的实际架构以及稳控装置之间的逻辑关系, 因此仅适用于物理结构清晰的简单系统, 并且不能用于计算系统的 MTTF^[36]。

2.2 故障树分析法

故障树分析法是一种“自上而下”的故障模式识别方法, 通过采用故障树符号, 建立树形结构, 将稳控系统失效事件以图形化的形式表示出来。其流程如图 1 所示。

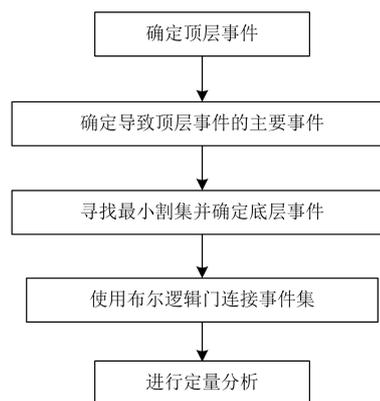


图 1 故障树建立流程

Fig. 1 Fault tree establishment process

故障树分析法用于稳控系统的可靠性建模, 能够清晰地反映出可能导致系统失效的故障组合。文献[34]通过建立故障树求取特定 SIL 等级下各元件 PFD 上限的过程充分体现了故障树分析法结构清晰、逻辑性强的优势。然而, 底层事件的确定需要利用最小割集, 当系统规模过于大型化和复杂化时, 利用该方法难以找出所有最小割集。同时, 不同最小割集可能导致同一事件, 容易造成概率重复叠加的问题^[24]。此外, 基于故障树建立的可靠性模型主要反映稳控装置或系统的静态逻辑, 难以体现系统的修复性能^[30,41]。

2.3 马尔可夫模型法

应用马尔可夫模型法进行可靠性分析的前提是系统为马尔可夫型可修复系统^[42-43]。稳控系统属于可修复系统, 其在运行过程中存在不同的状态, 当发生失效或修复时, 系统可以从一个状态转移到另

一个状态^[35],各状态之间相互转换的驱动力主要是部件的失效或修复概率(通常用失效率与修复率近似)。

马尔可夫建模及求解过程可以描述如下:

1) 分析运行中系统各元件可能出现的状态,进而确定由此导致的稳控系统的各种状态,绘制状态空间图。

2) 根据状态空间图建立如式(7)所示的状态转移矩阵 \mathbf{Q} 。其中,非对角元 $q_{ij}(i \neq j)$ 表示从状态 i 转移到状态 j 的概率,对角元 $q_{ii} = 1 - \sum_{j=1, j \neq i}^n q_{ij}$ 表示状态 i 的自转移概率。

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1n} \\ q_{21} & q_{22} & \cdots & q_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ q_{n1} & q_{n2} & \cdots & q_{nn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

3) 建立式(8),求解出稳控系统的状态概率矩阵 $\mathbf{P} = [p_1 \ p_2 \ \cdots \ p_n]$ 。根据系统处于各状态的概率,求解相关可靠性指标。

$$\begin{cases} \mathbf{PQ} = \mathbf{P} \\ \sum_{i=1}^n p_i = 1 \end{cases} \quad (8)$$

马尔可夫模型法的优势主要在于其灵活性,几乎可以对稳控系统的所有重要方面进行建模;在求解系统 MTTF 时,相较于可靠性框图法更具优势^[36]。当系统规模较大、元件数量较多时,准确建立马尔可夫模型将变得困难,计算速度变慢而耗时长。

2.4 蒙特卡罗法

蒙特卡罗法是一种基于概率和统计理论的随机数模拟方法,将其应用于稳控系统可靠性分析,能够得到有关可靠性指标的期望值与概率分布。利用蒙特卡罗法进行可靠性分析的基本思路是,构建系统模型、确定变量分布、进行概率抽样和处理抽样结果。可以利用序贯蒙特卡罗法进行稳控系统的可靠性分析,其抽样过程描述如下。

对于系统中任一元件 i ,按照“运行—失效—运行”的模式对其失效时间及修复时间进行抽样。当失效时间与修复时间均满足指数分布时,有式(9)。

$$\begin{cases} t_i = -\frac{1}{\lambda_i} \ln R_1 \\ t'_i = -\frac{1}{\mu_i} \ln R_2 \end{cases} \quad (9)$$

式中: t_i 、 t'_i 分别对应于元件 i 的失效时间与修复时

间; λ_i 、 μ_i 表示相应的失效率与修复率; R_1 、 R_2 为 $[0,1]$ 上按照均匀分布抽取的随机数。通过对系统不同元件运行模式进行抽取,结合系统的结构函数便可获得某一时刻的系统状态。

蒙特卡罗法的算法与程序结构相对简单,易于计算机实现,计算量受系统规模与复杂程度的影响较小,适用于大型复杂系统的可靠性建模,可以有效克服解析法这方面的不足。但蒙特卡罗法存在计算时间与计算精度相矛盾的缺陷,当对计算精度要求较高时,求解将非常耗时。

综上所述,四种可靠性评估方法各具特点,具有特定的应用场景。可靠性框图法与故障树分析法通常作为可靠性分析的初步工具,可以用于系统简化及系统失效原因查找,在一定条件下两种方法可以相互替代;马尔可夫模型法与蒙特卡罗法常用于特定指标的求取。下文结合稳控系统具体工程案例,分别利用马尔可夫模型法和蒙特卡罗法对其可靠性进行评估,并比较两种方法的优缺点,总结典型应用场景。

3 典型两层双套冗余配置的稳控系统架构

典型两层稳控系统通常由控制主站和执行站构成。控制主站具备较复杂的区域稳定控制功能,汇集本站和相关站点的信息,根据离线预定的控制策略,下达具体控制命令至执行站实施可控资源协调控制,一般不直接操作本站控制对象;执行站主要接受控制主站命令实施就地控制^[12]。

图 2(a)所示为工程中某个用于解决电厂送出稳定问题的稳控系统,由安装于变电站的控制主站和发电厂的执行站的装置构成,厂站内装置按双套冗余配置。控制主站的两套装置 A、B 通过光纤连接,进行信息交换;执行站的两套装置 A'、B' 通过电缆连接,主辅运行模式。为增加跳闸可靠性,各套装置针对每台机组提供两付跳闸出口接入两个跳闸线圈。正常运行模式下,系统中执行站装置采集机组运行信息并上送控制主站;控制主站识别电网故障、根据机组运行状态和出力情况,基于离线控制策略下达切机命令。当主站任一装置判出本套系统内某个节点出现异常,即从另柜数据中获取所需节点的相关信息,辅助参与本柜逻辑判断,以保证双套装置决策的依据保持一致。执行站两套装置同时收到主站命令,若主运装置先动作,则立即闭锁辅运装置;若主运装置收到命令并经一定延时未动作,则由辅运装置出口动作,同时闭锁主运装置。

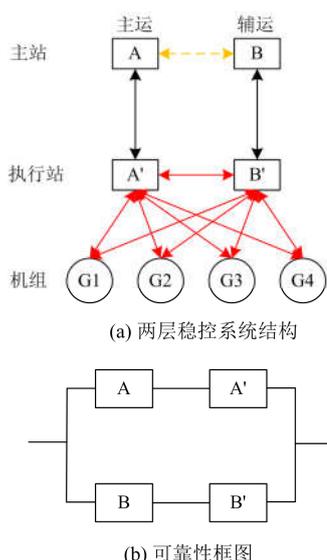


图 2 两层稳控系统结构与简化示意图

Fig. 2 Structure and simplified diagram of two-layer SSCS

对于结构较简单的系统，通过建立可靠性框图或者故障树能够快速找出系统的失效模式。上述两层稳控系统由 4 台稳控装置构成，装置间的逻辑关系较为简单，建立其可靠性框图如图 2(b)所示。由图可见，该系统包含两条最小路径，只有当两条最小路径即主辅运装置均出现故障停运时系统才会失效。

4 马尔可夫模型法与蒙特卡罗法分析对比

本节考察工程上较为关注的稳控系统的可用度指标，分别采用马尔可夫模型法和蒙特卡罗法对该指标进行求解。

在进行可靠性建模之前，首先对研究对象作如下假设：1) 构成稳控系统的各装置的故障与修复事件相互独立，并且装置下一时刻所处的状态仅与当前时刻的状态有关，与历史状态无关；2) 装置一旦出现故障则立即对其进行检修；3) 装置一经修复即可立即投入运行，不引入新的故障；4) 修复能达到理想效果，即“修复如新”。

稳控装置的失效和修复时间均满足指数分布，各装置的硬件架构和构成原理大体相同，往往基于同一平台开发，可以认为 4 台装置的失效率、修复率相同，分别设为 λ 和 μ 。

4.1 马尔可夫模型法分析

根据前述分析与假设，建立如图 3 所示的两层稳控系统马尔可夫状态空间转移图，可见系统共有 16 个状态，灰色代表系统失效，其他状态表示系统

可用。其中，“F”表示装置故障停运，“G”表示装置正常工作。

根据马尔可夫状态空间转移图建立状态转移矩阵，求解系统处于各个运行状态的概率，最终求得系统的可用度为

$$A = \sum p_i (i=1, \dots, 5, 6, 11) = \frac{2(1 + \frac{\lambda}{\mu})^2 - 1}{(1 + \frac{\lambda}{\mu})^4} \quad (10)$$

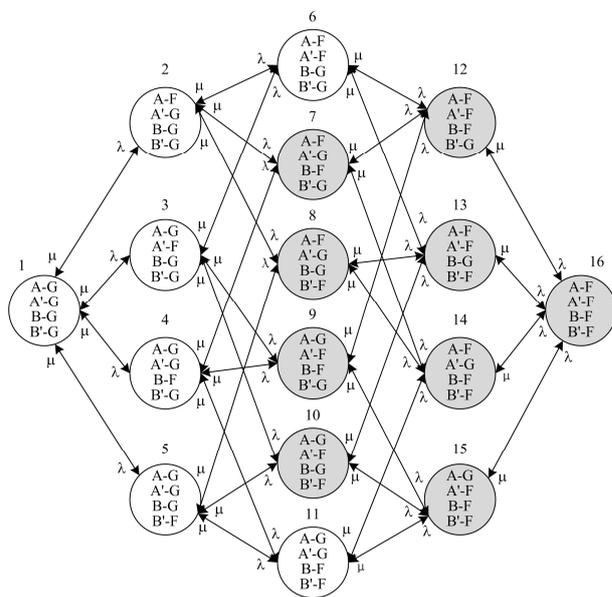


图 3 两层稳控系统马尔可夫状态空间转移图

Fig. 3 Markov state space transition diagram of two-layer SSCS

4.2 蒙特卡罗法分析

对于两层双套配置主辅运行的稳控系统，在一段时间内按照指数分布对各台装置的失效和修复时间进行随机抽样，将各装置的抽样时间进行排序，根据不同时段内装置的失效或者运行状态，可得系统的状态。图 4 所示为系统的状态抽样时序图。由图 4 可知，在 0 到 t_3 时段内，主运装置 A'、A 相继故障停运，辅运装置 B、B' 正常运行，系统可用；在 t_3 到 t_5 时段内，辅运装置 B' 故障停运，且主运装置未被修复，系统不可用；在 t_5 到 t_6 时段内，A、B' 被修复，但 A'、B 仍处于修复中，系统不可用；在 t_6 时刻，A' 被修复，同时 A 处于运行状态，系统恢复运行。其余时段的系统状态以此类推。

采用序贯蒙特卡罗方法编写 Matlab 程序进行可用度计算时，选取单次仿真中模拟系统运行时间为 1×10^7 h，仿真次数为 50 000 次。根据前文马尔可夫分析结果可见，系统可用度随 λ/μ 的变化而变

化, 可以选取 λ 为某一固定值, 通过改变 μ 的大小, 便能得到不同 λ/μ 取值下的系统可用度。参考文献[38]的数据选取装置失效率为 $5.93 \times 10^{-6}/h$ 。

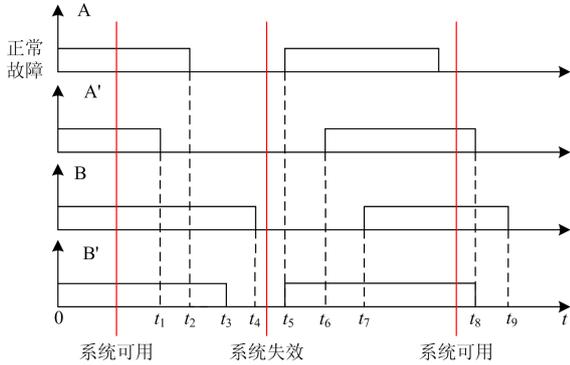


图 4 两层稳控系统状态抽样时序图

Fig. 4 State sampling sequence diagram of two-layer SSCS

4.3 两种方法分析结果

马尔可夫模型法与蒙特卡罗法的分析结果如表 1 和图 5 所示。

表 1 两种方法求得的稳控系统可用度

Table 1 Availability of the SSCS obtained by the two methods

λ/μ	0.01	0.1	0.5	1.0
马尔可夫	0.999 6	0.969 9	0.691 4	0.437 5
蒙特卡罗	0.999 5	0.969 2	0.691 5	0.441 3

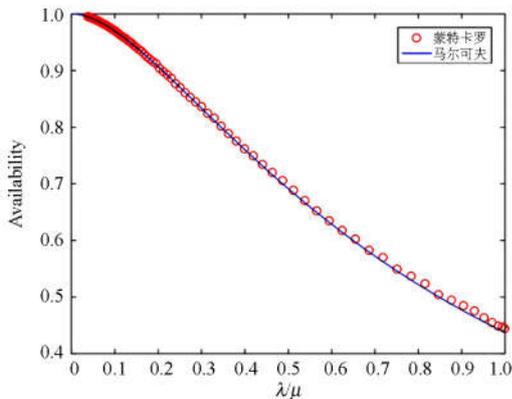


图 5 稳控系统可用度和 λ/μ 之间关系图

Fig. 5 Relationship between SSCS availability and λ/μ

可见, 两种方法所得不同 λ/μ 取值下的稳控系统可用度非常接近。可用度随着 λ/μ 的增大而减小, 当 λ/μ 等于 1 时, 系统可用度较低, 仅为 44%左右; 当 λ/μ 小于 0.01 时, 系统可用度将达到 99.9%以上。因此, 在设计稳控系统时, 可以通过减小稳控装置的失效率、增大修复率以提升系统的可靠性。

4.4 分析过程比较

在两层稳控系统可用度的计算中, 采用马尔可

夫模型法或蒙特卡罗模拟法都可以获得比较准确的评估结果。

马尔可夫模型法是一种解析法, 通过建立马尔可夫状态空间, 能够清楚地展现系统各状态之间的演变过程, 求得系统处于各种状态的概率及其数学表达式, 具有状态计算灵活、求解过程清晰等优点; 蒙特卡罗法是一种模拟法, 用此方法也可以求得相关可靠性指标, 通过增加仿真次数可以保证计算结果的准确度, 具有编程简单、受系统复杂程度影响较小、易于计算机实现等优点。与马尔可夫模型法相比, 蒙特卡罗方法在分析简单系统时, 对系统状态演变过程的体现不够直观, 并且计算时间受精度要求影响较大, 计算结果不能以数学表达式展现, 未能体现其优点, 建议采用马尔可夫模型法进行分析。

5 结论

加强稳控系统的可靠性研究对于保障电网安全稳定运行具有至关重要的作用。本文结合电网二次系统可靠性分析现状, 研究总结出适用于稳控系统的可靠性评估指标和四种可靠性分析方法。以两层双套冗余配置的稳控系统为例, 选取工程上较为关注的可用度指标, 采用马尔可夫模型法和蒙特卡罗法进行了可靠性评估对比。对于规模不大, 装置之间逻辑关系较为简单的稳控系统, 马尔可夫模型法比蒙特卡罗法更具优势。对于规模较大的稳控系统, 马尔可夫建模将变得困难, 可以考虑将可靠性框图或故障树与蒙特卡罗法相结合进行指标求解。

本文在对稳控系统可靠性进行评估时仅关注了装置失效率与修复率对系统可用度的影响。对于装置的动作判别逻辑以及装置之间的逻辑配合是否协调可靠值得进一步研究。此外, 在未来关于稳控系统可靠性的研究过程中, 还应注重对系统、装置及元件失效的基础性数据的收集与整理, 以便为后续深入开展稳控系统可靠性工作提供参考依据。

参考文献

[1] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.
LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991.

[2] 许婧. 考虑保护隐藏故障的复杂电力系统连锁故障分析研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2011.
XU Jing. Analysis and research on complex power

- system cascading failures considering hidden failure of protection[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2011.
- [3] 张天, 龚雁峰. 特高压交直流电网输电技术及运行特性综述[J]. 智慧电力, 2018, 46(2): 87-92.
ZHANG Tian, GONG Yanfeng. Research on transmission technologies and operational performance of UHV AC/DC power grid in China[J]. Smart Power, 2018, 46(2): 87-92.
- [4] 宋国兵, 蔡新雷, 高淑萍, 等. VSC-HVDC 频变参数电缆线路电流差动保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 105-111.
SONG Guobing, CAI Xinlei, GAO Shuping, et al. Novel current differential protection principle of VSC-HVDC considering frequency-dependent characteristic of cable line[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 105-111.
- [5] 董希建, 李惠军, 李雪明, 等. 并联高抗对稳控装置线路跳闸判据的影响及定值整定[J]. 陕西电力, 2016, 44(3): 68-70, 84.
DONG Xijian, LI Huijun, LI Xueming, et al. Influence of shunt reactor on power system security and stability control equipment trip criterion & fixed value setting[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(3): 68-70, 84.
- [6] 许涛, 励刚, 于钊, 等. 多直流馈入受端电网频率紧急协调控制系统设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 98-104.
XU Tao, LI Gang, YU Zhao, et al. Design and application of emergency coordination control system for multi-infeed HVDC receiving-end system coping with frequency stability problem[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 98-104.
- [7] SHEN H, YAO Y, DU N, et al. A method of emergency frequency control based on Multi-resources coordination[C] // 2018 International Conference of Green Buildings and Environmental Management, August 23-25, 2018, Qingdao, China: 1-8.
- [8] 庄伟, 李德胜, 于钊, 等. 应对多直流同时换相失败的安全稳定控制系统[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3420-3426.
ZHUANG Wei, LI Desheng, YU Zhao, et al. Security and stability control system coping with simultaneous multi-UHVDC commutation failure[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3420-3426.
- [9] 林伟芳, 孙华东, 汤涌, 等. 巴西“11·10”大停电事故分析及启示[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7): 1-5.
LIN Weifang, SUN Huadong, TANG Yong, et al. Analysis and lessons of the blackout in Brazil power grid on November 10, 2009[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 1-5.
- [10] 何大愚. 对美国西部系统 1996 年两次大事故的后续认识(分层分析)[J]. 中国电力, 1998, 31(5): 37-40.
HE Dayu. The successive ponderation (layers-built analysis) over U.S. WSCC two outages in 1996[J]. Electric Power, 1998, 31(5): 37-40.
- [11] 秦晓辉, 毕天姝, 杨奇逊. 基于广域同步量测的电力系统扰动识别与定位方法[J]. 电网技术, 2009, 33(12): 35-41.
QIN Xiaohui, BI Tianshu, YANG Qixun. WAMS based power system disturbance identification and location approach[J]. Power System Technology, 2009, 33(12): 35-41.
- [12] 方勇杰. 美国“9·8”大停电对连锁故障防控技术的启示[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 1-7.
FANG Yongjie. Lessons from September 8, 2011 southwest America blackout for prevention and control of cascading outages[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 1-7.
- [13] 易俊, 卜广全, 郭强, 等. 巴西“3·21”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(2): 1-6.
YI Jun, BU Guangquan, GUO Qiang, et al. Analysis on blackout in Brazilian power grid on March 21, 2018 and its enlightenment to power grid in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 1-6.
- [14] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [15] 罗剑波, 董希建, 崔晓丹, 等. 关于大型安全稳定控制系统可靠性研究的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 65-72.
LUO Jianbo, DONG Xijian, CUI Xiaodan, et al. Discussion on reliability of large scale security and stability control system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 65-72.
- [16] 张如义, 周玲, 董贯雷, 等. 单个厂站稳定控制系统的可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 61-64.
ZHANG Ruyi, ZHOU Ling, DONG Guanlei, et al. Reliability analysis of stability control system in single plant station[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 61-64.
- [17] 叶远波, 谢民, 王嘉琦, 等. 基于 Markov 模型与 GO 法的智能变电站继电保护系统实时可靠性分析[J]. 电力

- 系统保护与控制, 2019, 47(2): 47-55.
- YE Yuanbo, XIE Min, WANG Jiaqi, et al. Real time reliability analysis of relay protection system in intelligent substation based on Markov model and GO method[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 47-55.
- [18] 王文焕, 杨国生, 周泽昕, 等. 基于随机截尾数据及极大似然估计的继电保护可靠性分布[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 125-131.
- WANG Wenhuan, YANG Guosheng, ZHOU Zexin, et al. Reliability distribution of relay protection based on random truncation data and maximum likelihood estimation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 125-131.
- [19] 赵丽莉, 李雪明, 倪明, 等. 继电保护与安全稳定控制系统隐性故障研究综述及展望[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(22): 128-135.
- ZHAO Lili, LI Xueming, NI Ming, et al. Review and prospect of research on hidden failures of protection system and security and stability control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(22): 128-135.
- [20] 戴志辉, 王增平, 焦彦军. 基于动态故障树与蒙特卡罗仿真的保护系统动态可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(19): 105-113.
- DAI Zhihui, WANG Zengping, JIAO Yanjun. Dynamic reliability assessment of protection system based on dynamic fault tree and Monte Carlo simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19): 105-113.
- [21] 王献林, 吕飞鹏. 继电保护可靠性及其状态检修方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(9): 65-70.
- WANG Xianlin, LÜ Feipeng. Relay protection reliability and its state overhaul method[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(9): 65-70.
- [22] 王姗, 王朝辉. 基于故障树分析法的继电保护系统可靠性分析[J]. 陕西电力, 2011, 39(2): 26-29.
- WANG Shan, WANG Zhaohui. Reliability analysis of relay protection system based on fault tree analysis[J]. Shaanxi Electric Power, 2011, 39(2): 26-29.
- [23] 戴志辉, 李芷筠, 焦彦军, 等. 基于 BP 神经网络的小样本失效数据下继电保护可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 129-134.
- DAI Zhihui, LI Zhijun, JIAO Yanjun, et al. Reliability assessment based on BP neural network for relay protection system with a few failure data samples[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 129-134.
- [24] JIANG K, SINGH C. Reliability analysis of future special protection schemes[C] // 2010 48th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, September 29-October 1, 2010, Allerton, IL, USA: 1614-1621.
- [25] JIANG K, SINGH C. Reliability modeling of all-digital protection systems including impact of repair[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 579-587.
- [26] 陈志光, 黄明辉, 王峰, 等. 一种新型继电保护硬件失败率的计算方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(增刊 1): 68-71.
- CHEN Zhiguang, HUANG Minghui, WANG Feng, et al. New calculation method of protection hardware failure rate[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(S1): 68-71.
- [27] 肖世杰. 电网安全稳定控制应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [28] ZHAO L L, LI X M, NI M, et al. Review and prospect of hidden failure: protection system and security and stability control system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(6):1735-1743.
- [29] LI X M, LIU Z J, TANG Y. Reliability analysis of the security and stability control device based on the Monte Carlo method[C] // Applied Energy Symposium and Forum on Renewable Energy Integration with Mini/Microgrid REM 2017, October 18-20, 2017, Tianjin, China: 9-14.
- [30] 吴月明. 可修复元件的失效率和修复率仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(9): 2080-2085.
- WU Yueming. Simulation of failure rate and repair rate of repairable components[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(9): 2080-2085.
- [31] 王钢, 丁茂生, 李晓华, 等. 数字继电保护装置可靠性研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 47-52.
- WANG Gang, DING Maosheng, LI Xiaohua, et al. Reliability analysis of digital protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 47-52.
- [32] GOBLE W M. Control system safety evaluation and reliability[M]. Raleigh: ISA, 2010.
- [33] HSIAO T, LU C. Special protection system reliability assessment[C] // 2007 IEEE/IAS Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference, May 6-11, 2007, Edmonton, Canada: 1-7.
- [34] PANTELI M, CROSSLEY P A, FITCH J. Determining the reliability requirements of system integrity protection

- schemes[C] // IEEE/2014 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), July 7-10, 2014, Durham, UK: 1-6.
- [35] MCCALLEY J D, FU W. Reliability of special protection systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(4): 1400-1406.
- [36] JIANG K, SINGH C. Reliability evaluation of a conceptual all-digital special protection system architecture for the future smart grid[C] // 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 24-29, 2011, San Diego, USA: 1-8.
- [37] ADHIKARI B, BADACHI C A. Reliability assessment of special protection system at Kolar HVDC station[C] // 2014 International Conference on Advances in Electronics Computers and Communications, October 10-11, 2014, Bangalore, India: 1-5.
- [38] 赵丽莉, 王梦瑀, 倪明, 等. 安全稳定控制装置硬件系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 67-73.
- ZHAO Lili, WANG Mengxun, NI Ming, et al. Analysis of hardware system's reliability of security and stability control device[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 67-73.
- [39] PANTELI M, CROSSLEY P A, FITCH J. Quantifying the reliability level of system integrity protection schemes[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2014, 8(4): 753-764.
- [40] 朱星阳, 刘文霞, 张建华, 等. 计及系统调频作用的随机潮流模型与算法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 168-178.
- ZHU Xinyang, LIU Wenxia, ZHANG Jianhua, et al. Probabilistic load flow method considering function of frequency modulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 168-178.
- [41] 刘海峰, 肖繁, 赵永生, 等. 智能变电站集中式站域保护系统的可靠性分析[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 157-164.
- LIU Haifeng, XIAO Fan, ZHAO Yongsheng, et al. Reliability evaluation for centralized protection system of smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 157-164.
- [42] BILLINTON R, ALLAN R. Reliability evaluation of engineering systems: concepts and techniques[M]. New York: Plenum Press, 1992.
- [43] 张雪松, 王超, 程晓东. 基于马尔可夫状态空间法的超高压电网继电保护系统可靠性分析模型[J]. 电网技术, 2008, 32(13): 94-99.
- ZHANG Xuesong, WANG Chao, CHENG Xiaodong. Reliability analysis model for protective relaying system of UHV power network based on Markov state-space method[J]. Power System Technology, 2008, 32(13): 94-99.
- [44] 宗炫君, 袁越, 蒋科, 等. 基于晴空指数与波动特性的光伏电站可靠性分析[J]. 电力工程技术, 2019, 38(1): 36-41.
- ZONG Xuanjun, YUAN Yue, JIANG Ke, et al. Reliability analysis for the PV power plant based on the clearness index and variability characteristic[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(1): 36-41.

收稿日期: 2019-08-07; 修回日期: 2019-09-23

作者简介:

彭云豪(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统安全稳定控制; E-mail: yunhao@hhu.edu.cn

董希建(1982—), 男, 通信作者, 高级工程师, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统安全稳定控制; E-mail: dongxijian@sgepri.sgcc.com.cn

周海强(1971—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制。E-mail: js.hq@163.com

(编辑 周金梅)