

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.03.003

基于MCMC的电网安全稳定控制系统动态可靠性评估方法

阚骏^{1,2}, 董希建^{2,3}, 王敏¹, 夏海峰²

(1. 河海大学电气与动力工程学院, 江苏 南京 211100;

2. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏 南京 211106;

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: 现有安全稳定控制系统(简称稳控系统)的可靠性评估方法本质上属于静态建模, 由于未能体现系统内各装置老化和检修等动态过程, 在一定程度上影响了评估结果的准确性。为此, 文中提出一种基于马尔可夫链蒙特卡洛(Markov chain Monte Carlo, MCMC)的稳控系统动态可靠性评估方法。首先针对失效过程, 构建四状态非齐次马尔可夫模型来模拟装置老化过程, 并给出各状态评判方法; 其次针对修复过程, 分析不同检修策略对装置状态转移的影响以体现状态检修的差异性; 最后考虑稳控装置状态转移过程的时序或条件相关性, 对稳控系统可靠性进行动态建模。以实际稳控系统为例, 仿真对比不同检修策略下的可靠性, 并对模型参数进行灵敏度分析。评估结果表明, 该方法可以求解稳控系统的时变可用度, 用于指导稳控装置现场合理检修。

关键词: 安全稳定控制系统; 时变失效率; 动态可靠性; 状态检修; 马尔可夫链蒙特卡洛(MCMC); 灵敏度

中图分类号: TM77

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)03-0023-09

0 引言

随着“碳达峰、碳中和”战略的稳步推进, 我国电网呈现出“双高”(高比例可再生能源、高比例电力电子设备)和“双低”(低系统惯量、低抗干扰性)的叠加特征, 新的运行特征导致频率、电压、功角三大核心特性发生深刻变化, 加剧了电网安全稳定运行风险^[1-3]。当前和未来一段较长时期内, 电网安全稳定控制系统(简称稳控系统)仍将是保障电网安全稳定运行和提升输电能力的重要手段, 开展稳控系统的可靠性研究, 对于确保故障情况下稳定控制措施的安全可靠执行乃至对于保障电力系统可靠性均具有重要意义。

2010年左右我国启动特高压直流工程的规模化建设, 稳控系统随之突破传统的本地化和小型化模式, 其涵盖站点和控制规模迅速扩大。稳控系统误动或拒动产生的后果十分严重, 因此有关单位和专家基于隐性故障展开了稳控系统的可靠性研究^[4-7]。多年来, 稳控系统可靠性研究紧密结合电网发展和自身特点变化, 实现了从硬件到系统、从定性到定量的跨越, 在稳控装置硬件可靠性^[8]、稳控系统可靠性的主要影响因素^[9]、异地冗余架构的系统保护可靠性概率指标及求解方法^[10]、稳控系统可靠性建模评估方法^[11]以及可靠性薄弱环节辨识^[12]等方面取得了诸多进展。

然而, 当前稳控系统的可靠性建模方法缺乏对系统动态行为的考虑。实际工程中, 稳控系统的运行工况会受稳控装置自然老化和人为检修的影响而改变。在可靠性模型中若不能体现上述因素将直接影响评估结果的准确性甚至可信度, 因此有必要探索能够体现稳控系统多状态维度、多时间尺度的动态可靠性建模评估方法。同时, 状态检修由于可提高设备可靠性已在电力系统中得到广泛应用。文献[13-14]以输变电设备为对象, 指出状态检修相比定期检修提高了对检修时机把握的精确性, 提高了供电可靠性。文献[15-16]建立了状态检修下的继电保护可靠性分析模型, 得出状态检修可提高保护系统可靠性的结论。现有状态检修可靠性的研究主要针对一次设备和继电保护装置, 未见对状态检修方式下稳控系统可靠性的讨论。随着状态检修条件的日益成熟, 稳控系统可靠性评估中也应当考虑状态检修的需求特点。

马尔可夫解析法适合研究小型稳控系统的可靠性, 而在面对较大规模系统时, 蒙特卡洛法因不受状态维数的影响, 比马尔可夫法更具优势。又由于传统序贯^[17]或非序贯蒙特卡洛产生的随机序列彼此相互独立, 难以体现稳控装置老化和检修引发的状态转移过程中较强的条件相关性或时序相关性, 文中提出将马尔可夫链蒙特卡洛(Markov chain Monte Carlo, MCMC)方法应用到稳控系统的可靠性评估中, 实现抽样分布随模拟进行而变化的动态模拟。此处的“动态”主要体现在两方面: 在空间尺度

收稿日期: 2023-12-08; 修回日期: 2024-02-06

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB2400900)

上,模型能够反映系统内各装置多个且随机的运行状态;在时间尺度上,模型能够体现装置失效率的时变特性,从而完整描述稳控装置老化、故障及检修等动态过程对稳控系统可靠性的影响。

1 稳控装置状态转移过程

稳控系统一般由 2 个及以上厂站的稳控装置通信通道联络构成,因此对稳控装置进行可靠性建模是研究稳控系统可靠性的基础。与其他二次装置一样,稳控装置在运行过程中不可避免地会出现老化现象,但其具有可修复性,可采用马尔可夫理论进行分析。

1.1 马尔可夫模型拓展

传统静态可靠性建模方法^[11,17]采用如图 1 所示的正常、故障两状态模型来简化处理装置状态转移过程,且失效率 λ 采用恒定常数,无法定量表征老化、检修对装置可靠性的影响。图 1 中, μ 为稳控装置的修复率。



图 1 稳控装置两状态转移模型

Fig.1 Two-state transition model of the security and stability control device

设备在实际运行中的失效特性一般都符合“浴盆曲线”^[18],可用威布尔(Weibull)分布来描述其失效率变化过程。由于稳控装置在投运初期发生故障的几率很小,相较二参数 Weibull 分布函数,三参数 Weibull 分布函数引入门限参数可以更有效地模拟投运初期极少失效的实际情况^[19]。文中基于三参数 Weibull 分布构建了稳控装置在 t 时刻的失效率函数 $\lambda(t)$,如式(1)所示。

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (1)$$

式中: λ_0 为稳控装置偶然失效率; β 、 η 、 γ 分别为 Weibull 分布的形状参数、尺度参数和门限参数。

基于稳控装置的时变失效率,文中将两状态的齐次马尔可夫模型拓展为四状态的非齐次马尔可夫模型,如图 2 所示。图中, S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 分别代表稳控装置的正常、注意、异常和故障状态,各状态下装置的健康程度逐级劣化。假设当装置处于 S_1 状态时可完全正常运行; S_2 状态为发生非致命性失效,可暂时保持运行; S_3 状态为发生致命性失效但未被触发,可暂时保持运行;处于 S_4 状态则需要立刻退出运行并检修。 $\lambda_{i,j}(t)$ 、 $\mu_{i,j}$ 分别为 S_i 状态到 S_j 状态 ($i, j \in \{1, 2, 3, 4\}$) 的时变失效率与修复率。

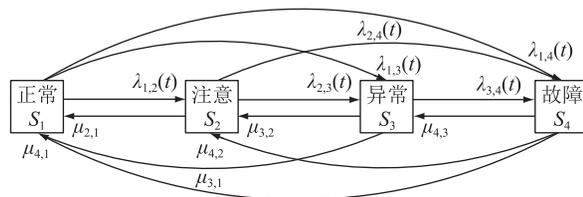


图 2 稳控装置四状态转移模型

Fig.2 Four-state transition model of the security and stability control device

四状态马尔可夫模型可以较好地模拟稳控装置在运行过程中的状态变化。如果不采取任何检修措施,装置将因老化或发生损坏等由 S_1 向 S_2 、 S_3 甚至 S_4 进行状态随机转移;如果适时检修和维护,则可以延缓装置老化,防止异常运行,甚至可以避免进入故障退出状态。

由于当前微机保护装置的智能化程度很高,普遍可以做到板件实时自检以及通过在线连续采集关键数据实现装置健康状况判断和异常定位^[20],一旦出现异常情况可及时报警并给出检修辅助决策,因此在模型中不再设置定期检修模型中的“检查状态”^[21]。

1.2 稳控装置状态评判方法

S_1 — S_4 状态的评判和设定根据装置构成和逻辑确定。当前主流的稳控装置一般由主控单元,采集、识别和执行单元,通信单元和人机交互单元四部分组成,各单元又由一块或多块数量不一的板卡或模块构成,如图 3 所示。

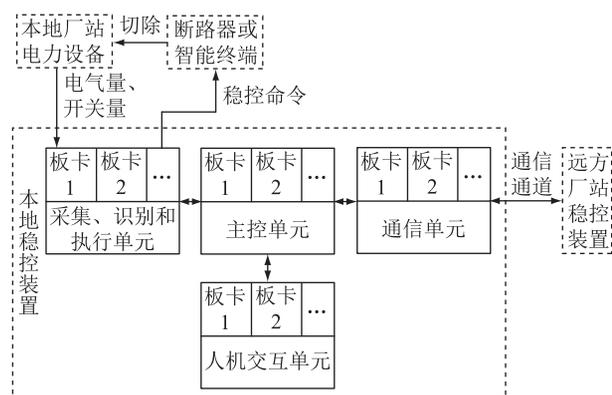


图 3 稳控装置结构

Fig.3 Structure of the security and stability control device

其中,主控单元是核心和枢纽,综合实现故障匹配、控制决策、命令或信号输出,与通信单元一起完成和其他厂站的远程通信,与人机交互单元一起完成运行信息展示、录波等人机交互功能。采集、识别和执行单元是门户,主要完成信息采集、故障识别,将信息和故障识别结果上送至主控单元,并接收和执行主控单元下发的控制命令。

各单元结构及板卡构成则因生产厂家不同而不同。某主流设备厂商生产的主控单元主要由电源模块、中央决策模块、通信管理模块、人机交互模块、弱电开入模块、强/弱电开出模块以及模入/模出模块等构成。采集、识别和执行单元则主要由电源模块、采样模块、滤波模块、故障识别模块、出口模块以及强电开入模块等构成。通信单元主要由通信主机模块和接口模块构成。可见,稳控装置各单元构成模块功能不一、数量庞杂,运行中老化或异常程度动态变化,如何在装置 4 个状态中显性和量化体现各模块的影响度是一个棘手问题。文中提出一种“综合打分法”,即事先综合各模块的重要程度及其发生异常后的影响面等因素,从而对各类模块赋予分值。比如,主流稳控装置里中央决策模块是决策的最高单元,应赋予较高分值;电源模块是支撑装置运行的基础,也需要赋予较高分值;而人机交互模块短时失效一般不影响控制措施实施,则可赋予较低分值。运行中根据在线监测到的总异常求和以及总分数确定装置处于 S_1 — S_4 中何种状态。

如表 1 所示对各模块赋分,运行中实时监测模块状态,根据模块类型和数量对分数进行归一化处理,获得稳控装置的状态评估分数 H ,如式(2)所示。

表 1 稳控装置状态评价对象及赋分

Table 1 State evaluation objects and scores of the security and stability control device

对象	赋分值	对象	赋分值
电源模块	M_1	滤波模块	M_8
中央决策模块	M_2	故障识别模块	M_9
通信管理模块	M_3	出口模块	M_{10}
弱电开入模块	M_4	强电开入模块	M_{11}
开出模块	M_5	通信主机模块	M_{12}
人机交互模块	M_6	通信接口模块	M_{13}
采样模块	M_7	∴	∴

$$H = \frac{\sum_{x=1}^X n_x m_x}{\sum_{x=1}^X n_x M_x} \quad (2)$$

式中: M_x 为第 x 类模块的赋分值; m_x 为第 x 类模块的得分值,模块发生异常得分为 0,否则得分为 M_x ; n_x 为装置中配备的第 x 类模块的数量; X 为模块类型数量。

依据“综合打分法”获得的分数所落入的划定区间判定装置状态,如表 2 所示。

需要说明的是,实际应用中应根据工程现场实际使用的装置类型、模块类型数量等因素调整表 2 中的状态评估分数区间,以体现不同设备厂商生产

表 2 稳控装置的状态划分

Table 2 State division of the security and stability control device

状态评估分数区间	状态评判结果
$H > h_1$	正常状态 S_1
$h_2 < H \leq h_1$	注意状态 S_2
$h_3 < H \leq h_2$	异常状态 S_3
$H \leq h_3$	故障状态 S_4

的装置类型的区别(实际工程中还存在同一稳控系统中使用同一厂商生产的不同代装置的情况)。

2 计及检修策略的稳控装置可靠性模型

不同的检修策略将产生差异化的稳控装置可靠性模型。状态检修往往是依据稳控装置的运行工况判断其所处状态,按照一定的门槛来决策其检修时机^[22-23]。对于图 2 中的四状态马尔可夫模型一共存在 3 种检修策略。

检修策略①:只有当监测到稳控装置处于 S_4 状态时采取检修手段,状态转移过程如图 4 所示。

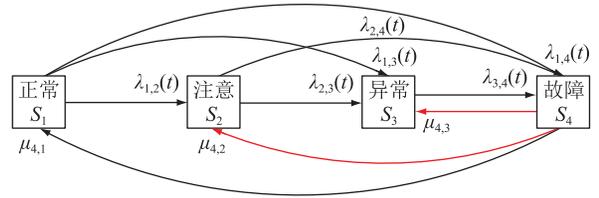


图 4 检修策略①的状态转移模型

Fig.4 State transition model of maintenance strategy ①

一般的状态转移模型假设检修为完全维修,但实际上处于 S_4 状态的稳控装置往往无法“修复如新”^[22],即修复后未必能达到 S_1 状态。工程应用中发现即使是同样型号的装置经过同样的检修操作,其修复程度仍存在差异。因此为体现修复效果的差异性,在该模型中设定稳控装置的修复率取值满足以下关系:

$$\begin{cases} \mu_{4,1} = a_1 \mu \\ \mu_{4,2} = a_2 \mu \\ \mu_{4,3} = a_3 \mu \\ a_1 + a_2 + a_3 = 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: a_1 、 a_2 、 a_3 分别为故障状态 S_4 到正常状态 S_1 、注意状态 S_2 、异常状态 S_3 的修复率所占比重。在该策略下,稳控装置在 S_1 、 S_2 、 S_3 状态均可保持运行。

检修策略②:当装置处于 S_1 和 S_2 状态时,不采取检修手段;当装置处于 S_3 或 S_4 状态时,采取检修手段,状态转移过程如图 5 所示。

各状态间的修复率取值除满足式(3)外,还应满足式(4)。

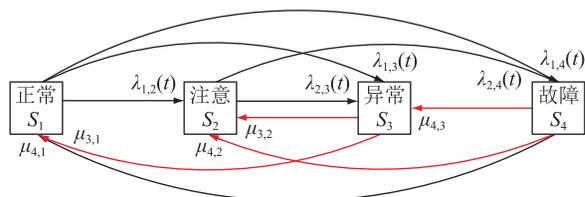


图5 检修策略②的状态转移模型

Fig.5 State transition model of maintenance strategy ②

$$\begin{cases} \mu_{3,1} = b_1 \mu \\ \mu_{3,2} = b_2 \mu \\ b_1 + b_2 = 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中： b_1 、 b_2 分别为异常状态 S_3 到正常状态 S_1 、注意状态 S_2 的修复率所占比重。假设检修时装置停运，则在该策略下稳控装置在 S_1 、 S_2 状态保持运行。

检修策略③：当装置处于 S_2 、 S_3 或 S_4 状态时，立即采取检修手段，状态转移过程如图6所示。

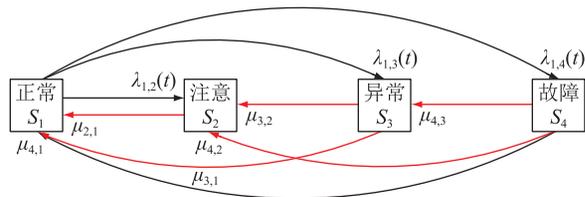


图6 检修策略③的状态转移模型

Fig.6 State transition model of maintenance strategy ③

在该模型中，修复率取值除满足式(3)及式(4)外，还应满足式(5)。

$$\mu_{2,1} = c\mu \quad (5)$$

式中： c 为注意状态 S_2 到正常状态 S_1 的修复程度。在该策略下，稳控装置仅在 S_1 状态保持运行。

3 稳控系统可靠性评估方法

3.1 状态抽样模型

设序列 $\{X_{i,k}, t=0, 1, 2, \dots\}$ 为稳控装置 k 的马尔可夫链，其状态空间 $I = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ ，初始分布为 $P\{X_{0,k} = S_j\} = q_j$ ，其中 $S_j \in I, j = 1, 2, 3, 4$ ； q_j 为 S_j 状态的初始概率值。时变状态转移概率密度矩阵 $Q(t)$ 如式(6)所示。

$$Q(t) = \begin{bmatrix} q_{11}(t) & q_{12}(t) & q_{13}(t) & q_{14}(t) \\ q_{21}(t) & q_{22}(t) & q_{23}(t) & q_{24}(t) \\ q_{31}(t) & q_{32}(t) & q_{33}(t) & q_{34}(t) \\ q_{41}(t) & q_{42}(t) & q_{43}(t) & q_{44}(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中： $q_{ij}(t)$ 为 S_i 状态到 S_j 状态的时变状态转移概率。

首先生成初始随机变量 $X_{0,k}$ 的样本值。

$$X_{0,k} \sim P(X_{0,k} = S_j) = q_j \quad (7)$$

若得到的 $X_{0,k}$ 的样本值为 S_{i_0} ，则产生随机变量

$$\begin{aligned} X_{1,k} : \\ X_{1,k} \sim P(X_{1,k} = S_j) = q_{i_0j}(1) \quad i_0 = 1, 2, 3, 4 \end{aligned} \quad (8)$$

若得到的 $X_{1,k}$ 的样本值为 S_{i_1} ，则产生随机变量

$$\begin{aligned} X_{2,k} : \\ X_{2,k} \sim P(X_{2,k} = S_j) = q_{i_1j}(2) \quad i_1 = 1, 2, 3, 4 \end{aligned} \quad (9)$$

依次类推采样，得到稳控装置 k 的时变状态序列。

3.2 可靠性评估指标

稳控系统的可靠性评估指标众多，可从不同维度来描述其可靠性^[11]。考虑到稳控系统是一种复杂的控制系统，文中认为可用率具有较高的工程价值。可用率 $A(t)$ 表征稳控系统在 t 时刻处于运行状态的概率。由于系统总是处于运行或者停运修复状态， $A(t)$ 可通过式(10)计算得到。

$$A(t) = \frac{t_{MTTF}}{t_{MTTF} + t_{MTTR}} \quad (10)$$

式中： t_{MTTF} 为截至 t 时刻系统保持运行的时间； t_{MTTR} 为系统停运时间。

3.3 可靠性评估流程

采用MCMC方法对稳控系统进行仿真时，首先需要通过装置的失效率、修复率以及计算机产生的一个服从均匀分布 $U(0, 1)$ 的随机数 τ 来确定各装置所处的状态。主要步骤如下：将各状态转移概率置于 $[0, 1]$ 区间，再生成在区间 $[0, 1]$ 均匀分布的随机数，由该随机数位置确定所处状态。

以采取检修策略②，在 $t=0$ 时刻处于异常状态 S_3 的稳控装置 k 为例，则下一时刻装置的状态如式(11)所示。

$$X_{t+1,k} = \begin{cases} 1 & 0 \leq \tau < b_1\mu \\ 0 & b_1\mu \leq \tau < b_1\mu + b_2\mu \\ 0 & \tau \geq b_1\mu + b_2\mu \end{cases} \quad (11)$$

其中， $X_{t+1,k} = 1$ 表示装置运行， $X_{t+1,k} = 0$ 表示装置停运。

然后基于系统结构函数，将各装置的时序状态通过“与”和“或”的关系进行逻辑计算，即可得到稳控系统的时序状态变化序列。重复多次仿真，通过概率统计的方法获得系统可靠性指标。

为减少仿真结果随机波动范围，文中给出的仿真结果均为多次独立仿真的统计平均值。稳控系统可靠性评估流程如图7所示，其中 i_{sim} 为蒙特卡洛的重复模拟次数。

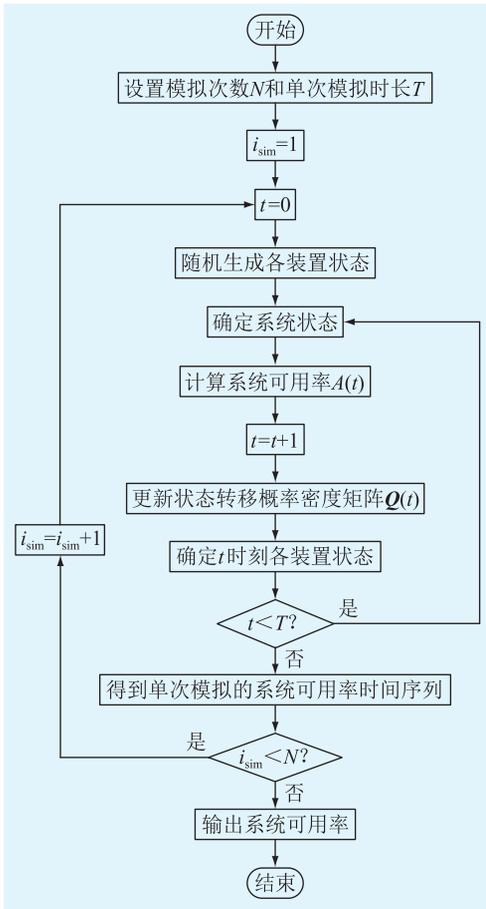


图7 稳控系统可靠性评估流程

Fig.7 Flow chart for reliability evaluation of the security and stability control system

4 算例分析

4.1 算例设置

稳控系统按分层分区原则设计,即由分布于不同厂站内的 A、B 两套稳控装置经通信通道联络构成多层架构的复杂系统,但可根据控制逻辑抽象出其可靠性分析的基础单元^[17],即为由 2 站 4 台装置构成的两层系统。一般稳控系统的可靠性模型均可由基础单元结合物理架构和逻辑关系推导得出。为表述方便,文中将基础单元描述为某发电厂的切机系统,如图 8 所示。

该稳控系统由安装在变电站的控制主站和安装在发电厂的执行站构成,厂站内装置均按 A、B 两套冗余配置。控制主站稳控装置负责识别电网故障、下达切机命令,执行站稳控装置负责采集机组运行信息上送至控制主站、并接收控制主站切机命令。当控制主站 A 正常且执行站 A' 正常,或者控制主站 B 正常且执行站 B' 正常时,认为稳控系统能够正确可靠地实施稳定控制。抽样时序如图 9 所示。

4.2 可用率计算

使用前述的建模仿真方法对该系统的可用率

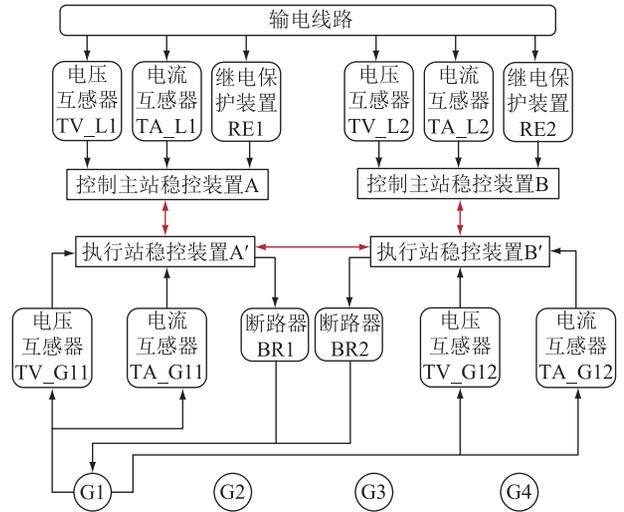


图8 某电厂送出线稳控系统示意

Fig.8 Schematic diagram of a security and stability control system of power plant feed line

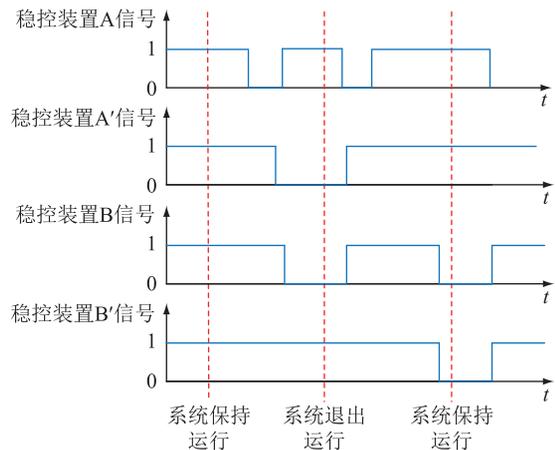


图9 稳控系统抽样时序示意

Fig.9 Sampling timing schematic diagram of the security and stability control system

进行求解。稳控装置的偶然失效率 λ_0 由文献[8]中数据折算而来;又由于稳控装置与继电保护装置同属微机保护装置,构造大致相同,可以认为二者老化进程相似,因此参照文献[19,24]来确定形状参数、尺度参数和门限参数的取值,由此求得稳控装置的时变失效率为:

$$\lambda(t) = 1.42 \times 10^{-4} + 2 \times 10^{-3} \left(\frac{t - 1529}{1302.4} \right)^{1.6} \quad (12)$$

参考文献[25-27]中给出的数据并结合现场工程经验,对图 2 模型中各状态间的失效率进行取值,如表 3 所示。

装置老化或损坏程度越严重越难修复,即稳控装置修复率系数通常满足 $a_1 > a_2 > a_3, b_1 > b_2$ 的关系。处于故障状态 S_4 的装置通常损坏严重,因此认为在

表3 稳控装置失效率参数选取
Table 3 Failure rate parameter selection of the security and stability control device

参数	取值	参数	取值
$\lambda_{1,2}(t)$	$4\lambda(t)$	$\lambda_{2,3}(t)$	$6\lambda(t)$
$\lambda_{1,3}(t)$	$2\lambda(t)$	$\lambda_{2,4}(t)$	$3\lambda(t)$
$\lambda_{1,4}(t)$	$\lambda(t)$	$\lambda_{3,4}(t)$	$8\lambda(t)$

有限的检修时间内仅有一半概率能被修复到正常状态;处于异常状态 S_3 的装置受损没有处于故障状态 S_4 的装置严重,经过检修回到正常状态的概率比由 S_4 状态回到正常状态的概率高,即 $b_1 > a_1$;处于注意状态 S_2 的稳控装置经过检修即可完全恢复正常。综合考虑后对各修复率参数的取值如表4所示。

表4 稳控装置修复率参数选取
Table 4 Repair rate parameter selection of the security and stability control device

参数	取值	参数	取值
a_1	0.5	b_1	0.8
a_2	0.3	b_2	0.2
a_3	0.2	c	1

DL/T 587—2016《继电保护和自动装置运行管理规程》中规定:微机保护装置的使用年限一般不低于12 a。考虑到元器件的更新换代规律以及备品备件库存周期,电网公司通常在15 a之前就会安排装置大修或升级。文中据此以中间值5 000 d(约13.5 a)为时间周期,对稳控系统进行仿真。假设装置的检修时长为1 d(即 $\mu = 1$ 次/d),4台稳控装置初始状态均为正常,分别仿真100 000次直至收敛,得到在3种不同检修策略下的稳控系统可用率随时间变化的曲线,如图10所示。

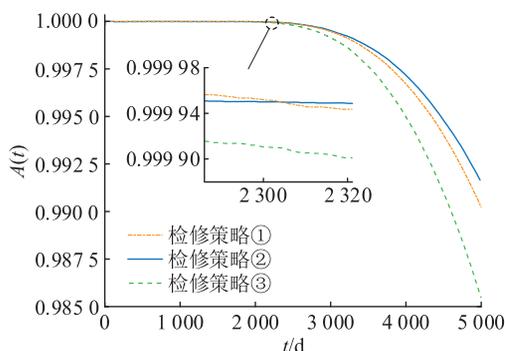


图10 不同检修策略对稳控系统可用率的影响对比
Fig.10 Comparison of the influence of different maintenance strategies on availability of the security and stability control system

由图10可知,检修策略③的系统可用率曲线始终低于检修策略①和②;检修策略①和②在2 305 d左右出现了交叉,在此之前,前者的系统可

用率要高于后者。从而可得出结论:(1) 过低的检修门槛或频繁检修都会造成过度检修,从而未必可以将系统可用率保持在较高水平;(2) 当稳控装置的老化作用明显时,提前介入检修可避免稳控装置运行状态进一步恶化,提高了系统整体可用率;(3) 在系统运行过程中,可按时段采取不同的检修策略,在装置投运至2 305 d(约6.3 a)前采用检修策略①,之后则采用检修策略②。本次仿真获得的“6.3 a”与Q/GDW 11488—2015《电网安全自动装置检验规范》中规定的“微机型安全自动装置”全部检验周期的“6 a”相当,在一定程度上证明了文中仿真方法和参数设置的有效性与合理性。

4.3 灵敏度分析

分别令稳控装置的失效率和修复率在 $\pm 50\%$ 内变化,分析其变化对系统可用率的影响程度,即灵敏度。图11为蒙特卡洛模拟求得的检修策略②下系统可用率随装置失效率和修复率变化的仿真曲面。

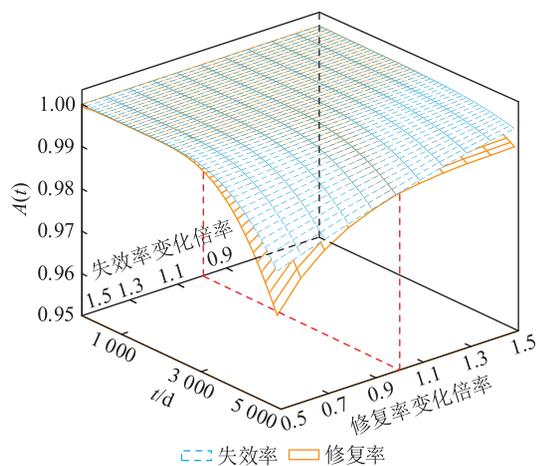


图11 失效率和修复率变化对稳控系统可用率的影响
Fig.11 Influence of the failure rate and repair rate variation on availability of the security and stability control system

通过分析图11可知,降低稳控装置的失效率或提高修复率均可提高稳控系统的可用率;在相同的倍率变化区间[0.5,1.5]内,失效率对应的系统可用率始终高于修复率对应的系统可用率,说明在同等条件下,应优先采取保障装置失效率的手段;随着运行时间增加,修复率下降导致的系统可用率下降的幅度显著大于失效率的影响,因此装置运行一段时间后,应格外注意自检或以其他形式发现的异常并及时处理。

进一步对策略②状态转移模型中5个失效率参数的灵敏度进行分析。具体方法为:在其他参数保持不变的前提下,分别将待变参数减小为原值的

50%,求得评估周期内稳控系统可用率的变化情况,如图 12 所示。

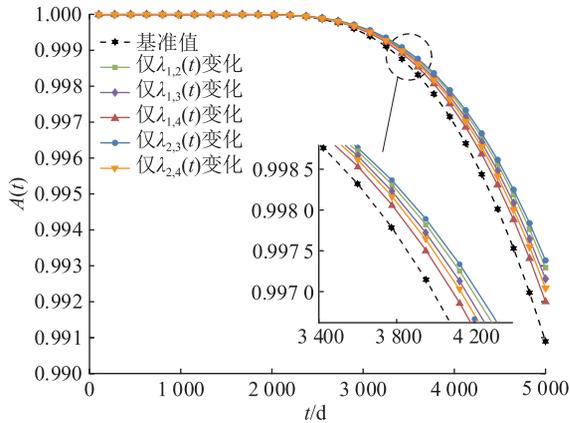


图 12 失效率参数减小对稳控系统可用率的影响

Fig.12 Influence of failure rate parameter reduction on availability of the security and stability control system

由图 12 可知,总体上, $\lambda_{2,3}(t)$ 的减小对稳控系统可用率的影响最为显著。因此,在运行维护中除常规检查外,还应格外关注那些不易被检出的故障。例如,某“异常”状态的稳控装置,其采集、识别和执行单元的某块出口模块失效时,当值策略的待切机对象恰好并不是通过该出口模块出口,此时应尽快实施检修,否则若当值策略搜索到切机对象处于该块出口板时将无法实施有效切机。减少类似失效情况发生可有效降低稳控系统发生控制功效受损的可能性,提高稳控系统乃至电力系统的可靠性。

5 结语

文中首次提出了一种基于 MCMC 的电网稳控系统动态可靠性评估方法,并将其应用在一个典型两层架构的稳控系统可靠性建模和可用率求解中,主要取得如下进展:

(1) 所提方法由于计及稳控装置的老化、故障及检修行为带来的影响,可以及时反映稳控系统运行状态和实时可靠性水平,而这在以往稳控系统的静态建模评估方法中是无法实现的。

(2) 结合稳控系统状态转移过程特点,引入 MCMC 方法求解可用率,大幅降低了计算复杂度。稳控系统状态检修下的统一建模方法以及工程适用可靠性指标体系的建立将是未来研究的重点。

参考文献:

[1] 王增平,林一峰,王彤,等. 电力系统继电保护与安全控制面临的挑战与应对措施[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(6):10-20.

WANG Zengping, LIN Yifeng, WANG Tong, et al. Challenges and countermeasures to power system relay protection and safety control[J]. Power System Protection and Control,2023,51(6):10-20.

[2] 曹永吉,张恒旭,施啸寒,等. 规模化分布式能源参与大电网安全稳定控制的机制初探[J]. 电力系统自动化,2021,45(18):1-8.

CAO Yongji, ZHANG Hengxu, SHI Xiaohan, et al. Preliminary study on participation mechanism of large-scale distributed energy resource in security and stability control of large power grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(18):1-8.

[3] 袁小明,张美清,迟永宁,等. 电力电子化电力系统动态问题的基本挑战和技术路线[J]. 中国电机工程学报,2022,42(5):1904-1917.

YUAN Xiaoming, ZHANG Meiqing, CHI Yongning, et al. Basic challenges of and technical roadmap to power-electronized power system dynamics issues[J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(5):1904-1917.

[4] 程雅梦. 安全稳定控制装置(系统)隐性故障辨识与预警研究[D]. 江苏:国网电力科学研究院,2014.

CHENG Yameng. Research on hidden fault identification and early warning of safety and stability control device (system) [D]. Jiangsu: State Grid Electric Power Research Institute, 2014.

[5] 戴志辉,李金铄,耿宏贤,等. 继电保护系统隐性故障识别方法及软件设计与实现[J]. 智慧电力,2022,50(5):77-84.

DAI Zhihui, LI Jinshuo, GENG Hongxian, et al. Recognition method & software design of hidden faults in relay protection system[J]. Smart Power,2022,50(5):77-84.

[6] 欧阳金鑫,张澳归,蒋航,等. 基于深度置信网络的电网安全稳定控制系统故障诊断方法[J/OL]. 电测与仪表,2022:1-8.(2022-10-19)[2023-12-22]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20221019.1011.002.html>.

OUYANG Jinxin, ZHANG Aogui, JIANG Hang, et al. Fault diagnosis method of power grid security and stability control system based on deep belief network [J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation,2022:1-8.(2022-10-19)[2023-12-22]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20221019.1011.002.html>.

[7] LI S H, ZHOU H M, YAN Y S, et al. Reliability and sensitivity analysis of loop-designed security and stability control system in interconnected power systems[J]. Global Energy Interconnection,2022,5(5):501-511.

[8] 赵丽莉,王梦璋,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.

[9] 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.
- [10] DONG X J, JIA H P, LI B J, et al. Reliability analysis of security and stability control systems with remote redundancy in power systems[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 227: 032005.
- [11] 彭学豪,董希建,周海强,等. 电网安全稳定控制系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 123-131.
PENG Yunhao, DONG Xijian, ZHOU Haiqiang, et al. Reliability evaluation of power grid security and stability control system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 123-131.
- [12] 李生虎,周慧敏,颜云松,等. 扁平化安全稳定控制系统薄弱环节辨识[J]. 电力工程技术, 2022, 41(3): 32-38.
LI Shenghu, ZHOU Huimin, YAN Yunsong, et al. Vulnerability differentiation to flat security and stability control system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 32-38.
- [13] 李明,韩学山,杨明,等. 电网状态检修概念与理论基础研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 43-52, 6.
LI Ming, HAN Xueshan, YANG Ming, et al. Basic concept and theoretical study of condition-based maintenance for power transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 43-52, 6.
- [14] 许易经,韩学山,杨明,等. 基于设备在线监测的电网状态检修决策模型[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23): 72-81.
XU Yijing, HAN Xueshan, YANG Ming, et al. Decision-making model of condition-based maintenance for power grid with equipment on-line monitoring[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 72-81.
- [15] 戴志辉,张天宇,刘譞,等. 面向状态检修的智能变电站保护系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 14-21.
DAI Zhihui, ZHANG Tianyu, LIU Xuan, et al. Research on smart substation protection system reliability for condition-based maintenance[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 14-21.
- [16] 叶远波,刘宏君,黄太贵,等. 变电站继电保护设备状态检修可靠性分析方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 170-177.
YE Yuanbo, LIU Hongjun, HUANG Taigui, et al. Research on the reliability analysis method of condition-based maintenance of relay protection equipment in substation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 170-177.
- [17] 朱介北,邱威,孙宁,等. 基于序贯蒙特卡洛法的安全稳定控制系统架构可靠性分析[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(15): 21-27.
ZHU Jiebei, QIU Wei, SUN Ning, et al. Reliability analysis of security and stability control system architecture based on sequential Monte Carlo method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(15): 21-27.
- [18] 郭升,童晓阳,王洪彬. 计及设备老化与计划检修的智能变电站保护系统可靠性评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 97-104.
GUO Sheng, TONG Xiaoyang, WANG Hongbin. Intelligent substation protection system reliability assessment method considering the aging of equipment and planned maintenance[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 97-104.
- [19] 薛安成,罗麟,景琦,等. 基于三参数 Weibull 分布的继电保护装置老化失效率估算[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 72-78.
XUE Ancheng, LUO Lin, JING Qi, et al. Research on aging failure rate estimation of protective relay based on three-parameter Weibull distribution[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 72-78.
- [20] 蔡骥然,郑永康,周振宇,等. 智能变电站二次设备状态监测研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 148-154.
CAI Jiran, ZHENG Yongkang, ZHOU Zhenyu, et al. A survey of research on secondary device condition monitoring in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 148-154.
- [21] 郅朝辉,李威,崔晓丹,等. 基于分层马尔可夫的可修复稳定控制系统可靠性分析[J]. 中国电力, 2020, 53(3): 101-109.
QIE Zhaohui, LI Wei, CUI Xiaodan, et al. Reliability analysis of repairable stability control system based on hierarchical Markov[J]. Electric Power, 2020, 53(3): 101-109.
- [22] 罗凤章,张天宇,王成山,等. 基于多状态马尔科夫链的配电设备状态检修策略优化方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2777-2787.
LUO Fengzhang, ZHANG Tianyu, WANG Chengshan, et al. Research on optimization method of condition based maintenance strategy for distribution system equipment based on the multi state Markov chain[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2777-2787.
- [23] 叶远波,谢民,陈晓东,等. 基于故障率分析的继电保护系统状态检修策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 167-173.
YE Yuanbo, XIE Min, CHEN Xiaodong, et al. A condition-based maintenance strategy for a relay protection system based on failure probability analysis[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 167-173.
- [24] 余锐,钟璐,陈柏汗,等. 考虑关联故障率的电网稳定控制系统复合检修决策方法[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(4): 87-96.
YU Rui, ZHONG Lu, CHEN Baihan, et al. Compound maintenance decision method for power grid stability control system considering associated failure rate[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(4): 87-96.
- [25] 欧阳金鑫,于莉,蒋航,等. 基于多层随机优化的电网安全稳定控制装置机会检修决策方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(6): 144-151.

- OUYANG Jinxin, YU Li, JIANG Hang, et al. Opportunistic maintenance decision method for power grid security and stability control device based on multi-layer stochastic optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(6):144-151.
- [26] 李浩, 林湘宁, 喻锟, 等. 基于连续时间马尔可夫链的继电保护装置动作行为预测模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(S1):121-128.
- LI Hao, LIN Xiangning, YU Kun, et al. Based on continuous time Markov chain prediction model of action behavior of relay protection device [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1):121-128.
- [27] 汲国强, 吴文传, 张伯明, 等. 一种适用于状态检修的电力设备时变停运模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25):139-146, 21.
- JI Guoqiang, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A time-varying component outage model for power system condition-based maintenance [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25):139-146, 21.

作者简介:



阚骏

阚骏(1999),男,硕士在读,研究方向为电力二次系统可靠性(E-mail: kanjun99@163.com);

董希建(1982),男,硕士,正高级工程师,从事电力系统安全稳定控制工作;

王敏(1974),女,博士,副教授,研究方向为电力系统规划与可靠性。

Dynamic reliability evaluation method of power grid security and stability control system based on Markov chain Monte Carlo

KAN Jun^{1,2}, DONG Xijian^{2,3}, WANG Min¹, XIA Haifeng²

(1. School of Electrical and Power Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

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

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

Abstract: The current reliability evaluation method of the security and stability control system (SSCS) is primarily based on static modeling, which fails to capture the dynamic aging and maintenance processes of individual devices within the system, thereby impacting the accuracy of evaluation results to a certain extent. Therefore, a dynamic reliability evaluation method of the SSCS based on Markov chain Monte Carlo (MCMC) is proposed in this paper. Firstly, the four-state non-homogeneous Markov model is constructed to simulate the aging process of the device, and the evaluation methods of each state are given. Secondly, according to the repair process, the influence of different maintenance strategies on the state transition of the device is analyzed to reflect the difference of state maintenance. Finally, the reliability of the SSCS is modeled dynamically by considering the temporal or conditional correlation of the state transition process of the security and stability control device. Taking the actual SSCS as an example, the reliability under different maintenance strategies is compared by simulation, and the sensitivity of model parameters is analyzed. The evaluation results show that this method can solve the time-varying availability of the SSCS, and can be used to guide the reasonable maintenance of the security and stability control device on site.

Keywords: security and stability control system; time-varying failure rate; dynamic reliability; condition-based maintenance; Markov chain Monte Carlo (MCMC); sensitivity

(编辑 陆海霞)