

柔性输电设备短期可靠性评估算法

李生虎, 刘正楷, 崔芳, 郑杨斌

(合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 基于大功率电力电子技术的柔性输电设备, 元件修复(替换)时间差异很大, 可能包括冗余元件。其可靠性水平与运行方式和故障模式有关, 状态概率随时间变化。采用稳态不可用率抽样设备状态, 将引起较大误差。基于有限可靠性评估周期, 建立适于多状态系统的平均不可用率解析算法。证明平均不可用率与状态初值、可靠性评估周期有关。证明平均不可用率不能按串并联结构直接等值。给出了高压直流输电系统换流桥的分析结果以检验算法的可行性。

关键词: 可靠性评估; 柔性输电设备; 瞬时状态概率; 平均不可用率

Short term reliability evaluation algorithm for flexible transmission equipments

LI Sheng-hu, LIU Zheng-kai, CUI Fang, ZHENG Yang-bin

(School of Electrical Engineering and its Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Flexible transmission equipments are based on high power electronics elements with different repair/replacement duration and redundant design. Their risk level is decided by the operation conditions and failure modes, therefore time-dependent. Notable error will be introduced by state sampling with the steady-state unavailability. Based on limited evaluation period, analytical solution to the average unavailability of multi-state systems is proposed, which is dependent on the initial states and evaluation periods. It is proved that the average unavailability can not be directly calculated by the series/parallel configuration. Numerical analysis for HVDC converters with redundant valves is provided to validate the feasibility of the proposed algorithm.

This work is supported by Science and Technological Fund of Anhui Province for Outstanding Youth (No.08040106825), Program for New Century Excellent Talents in University of China (NCET 08-0765), and National Natural Science Foundation of China (No.50707006).

Key words: reliability evaluation; flexible transmission; instantaneous state probability; average unavailability

中图分类号: TM721.1; TM732 文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2009)21-0001-06

0 引言

基于大功率电力电子技术的柔性交流、直流输电设备, 如静止无功补偿器、晶控串补^[1,2]、静止同步补偿器、静止同步串补、统一潮流控制器^[3,4]、高压直流输电^[5,6]、轻型直流输电等, 广泛应用于输电系统无功补偿和稳定控制。

柔性输电设备可靠性评估范围包括硬件结构和保护控制功能, 前者又分电气和非电气部分(如水冷系统), 现有研究主要针对电气结构。基于串并联结构, 可采用故障枚举^[7]、故障树^[8]、频率与持续时间^[9-13]、基于蒙特卡罗仿真^[14,15]等方法, 建立多容

量等值模型, 计算设备不可用率指标并用于电力系统概率评估。

传统设备可靠性评估适用稳态不可用率, 用于年度规划设计分析。由于电网运行方式、故障模式和市场因素的变化^[16], 稳态可靠性指标很难反映当前运行风险, 也不能提供相应预防控制措施。因此在线甚至实时可靠性评估得到广泛重视^[17-19], 根据运行条件变化修正元件故障率。但即使故障率不变, 有限评估周期内不可用率也随时间变化。现有暂态和临时强迫停运定义, 反映了自动或手动恢复的停运事件^[20], 并未反映瞬时不可用率。

本文研究了柔性输电设备的短期可靠性评估。针对其转移持续时间差异大、含冗余备用元件等特点, 基于有限评估周期, 建立适于瞬时状态概率解析算法, 检验了对于评估周期和串并联结构的等值

基金项目: 教育部新世纪人才支持计划(NCET-08-0765); 安徽省优秀青年科技基金(08040106825); 国家自然科学基金(50707006)

效果。最后将算法应用于直流输电换流桥的短期可靠性评估。

1 瞬时状态概率

马尔可夫过程稳态状态概率列向量 \mathbf{P} 见式(1), 其中 Φ 为转移率矩阵 \mathbf{A} 的转置, n 为状态数。由此得到系统稳态可用率 A 和稳态不可用率 U 。计算可证明, \mathbf{P} 、 A 、 U 与状态初值无关。

$$\begin{cases} \Phi \mathbf{P} = (0, 0, \dots, 0)^T \\ \sum P_i = 1 \end{cases} \quad (1)$$

瞬时状态概率 $\mathbf{P}(t)$ 见式(2)。令 \mathbf{U} 和 \mathbf{D} 分别为系统工作和故障子集, 根据状态概率初值 $\mathbf{P}(t_0)$, 采用拉氏变换或求解微分方程, 可得到 $\mathbf{P}(t)$ 和系统瞬时不可用率 $U(t)$ 式(3)~(4)。

$$\dot{\mathbf{P}}(t) = \Phi \mathbf{P}(t) \quad (2)$$

$$\mathbf{P}(t) = e^{\Phi(t-t_0)} \mathbf{P}(t_0) \quad (3)$$

$$U(t) = \sum_{j \in \mathbf{D}} P_j(t) \quad (4)$$

对于单元件两状态可修复系统, 令 λ 和 μ 为故障率和修复率, 下标 1 和 2 表示系统处于工作或者故障状态, 解得 $\mathbf{P}(t)$ 和 $U(t)$ 式(5)~(6)。

(1) 对有限可靠性评估周期 $\tau = [t_1, t_2]$ ($t_0 \leq t_1 < t_2$), 取起点或终点的瞬时不可用率 $U(t_1)$ 或 $U(t_2)$, 可能过高或过低估计设备可靠性, 即瞬时不可用率将引起较大误差。

(2) 瞬时不可用率与状态初值有关。初始状态中可能部分设备不可用, 或者包括备用元件^[21]。备用元件是否可用属非暴露性故障, 往往在需要投入工作时才能确定。

$$\mathbf{P}(t) = \frac{1}{\lambda + \mu} \begin{bmatrix} \mu + \lambda e^{-(\lambda + \mu)(t-t_0)} & \mu - \mu e^{-(\lambda + \mu)(t-t_0)} \\ \lambda - \lambda e^{-(\lambda + \mu)(t-t_0)} & \lambda + \mu e^{-(\lambda + \mu)(t-t_0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1(t_0) \\ P_2(t_0) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$U(t) = P_2(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda P_1(0) - \mu P_2(0)}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)(t-t_0)} \quad (6)$$

在故障枚举、故障树或非序贯蒙特卡罗抽样等电力系统概率分析中, 常采用不可用率抽样设备随机故障。鉴于瞬时状态概率及瞬时不可用率随时间变化, 有必要在有限评估周期内进行时间等值, 然后检验其对于串并联元件可否直接等值。

2 有限评估周期内平均不可用率

根据状态初值 $\mathbf{P}(t_0)$, 定义时段 $[t_1, t_2]$ 内平均不可用率 $U[t_1, t_2]$ (或平均可用率 $A[t_1, t_2] = 1 - U[t_1, t_2]$):

$$U[t_1, t_2] = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} U(t) dt \quad (7)$$

对单元件两状态系统, 状态初值 $\mathbf{P}(t_0)$ 可能为 $(1, 0)^T$ (元件可用)、或者 $(0, 1)^T$ (元件不可用)。取可靠性评估周期 $[0, \tau]$, 得到系统平均不可用率:

$$U_{(1,0)}[0, \tau] = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{(\lambda + \mu)^2 \tau} \left[e^{-(\lambda + \mu)\tau} - 1 \right] \quad (8)$$

$$U_{(0,1)}[0, \tau] = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\mu}{(\lambda + \mu)^2 \tau} \left[e^{-(\lambda + \mu)\tau} - 1 \right] \quad (9)$$

对于多状态系统, 可先计算各个不可用状态的概率 $P_i(t)$, 然后逐一积分式(10)。但是 $P_i(t)$ 解析形式比较繁琐, 该方法效率过低难以实现。

$$U[t_1, t_2] = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \left[\sum_{i \in \mathbf{D}} P_i(t) \right] dt}{t_2 - t_1} = \frac{\sum_{i \in \mathbf{D}} \left[\int_{t_1}^{t_2} P_i(t) dt \right]}{t_2 - t_1} \quad (10)$$

理论上, 通过直接积分计算 $\mathbf{P}[t_1, t_2]$ 式(11), 可得 $U[t_1, t_2]$ 。但由于 Φ 奇异, $\mathbf{P}[t_1, t_2]$ 无法直接计算。

$$\mathbf{P}[t_1, t_2] = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \mathbf{P}(t) dt = \frac{\Phi^{-1}[\mathbf{P}(t_2) - \mathbf{P}(t_1)]}{t_2 - t_1} \quad (11)$$

将第 i 状态概率导数展开成式(12)。鉴于各状态概率之和为 1, 类似潮流计算中平衡节点处理方法, 消去任一状态 n , 其余 $n-1$ 个状态重写成矩阵形式式(13), 解得瞬时状态概率式(14), 其中 \mathbf{C} 和 \mathbf{D} 为系数矩阵, \mathbf{C} 可逆。平均状态概率 $\mathbf{P}[t_1, t_2]$ 见式(15)。其中 $\mathbf{P}(t_1)$ 和 $\mathbf{P}(t_2)$ 是依赖 $\mathbf{P}(t_0)$ 的条件概率。由此计算平均可用率 $A[t_1, t_2]$ 和平均不可用率 $U[t_1, t_2]$, 后者即为 $[t_1, t_2]$ 内的等值强迫停运率。

$$\dot{P}_i(t) = \sum_{j=1}^n \varphi_{ij} P_j(t) = \sum_{j=1}^{n-1} \varphi_{ij} P_j(t) + \varphi_{in} P_n(t) = \sum_{j=1}^{n-1} (\varphi_{ij} - \varphi_{in}) P_j(t) + \varphi_{in}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

$$\dot{\mathbf{P}}(t) = \mathbf{C} \mathbf{P}(t) + \mathbf{D} \quad (13)$$

$$\mathbf{P}(t) = e^{\mathbf{C}(t-t_0)} \left(\mathbf{P}(t_0) + \mathbf{C}^{-1} \mathbf{D} \right) - \mathbf{C}^{-1} \mathbf{D} \quad (14)$$

$$\mathbf{P}[t_1, t_2] = \frac{\mathbf{C}^{-1}[\mathbf{P}(t_2) - \mathbf{P}(t_1)]}{t_2 - t_1} - \mathbf{C}^{-1} \mathbf{D}, \quad \mathbf{P}(t_0) \quad (15)$$

3 串并联结构等值误差

从可靠性分析角度, 柔性输电设备可看作是多个元件和保护控制功能的串并联组合。在故障枚举、故障树等稳态可靠性评估中, 经常直接等值稳态不

可用率式(16), 其中下标 s 和 p 表示串联和并联系统。

$$\begin{cases} U_s = 1 - \prod A_i = 1 - \prod (1 - U_i) \\ U_p = \prod U_i \end{cases} \quad (16)$$

以两元件为例, 推导串并联等值误差, 多元件依此类推。图 1 中两元件 I、II 为串联或并联形式, 虚框表示不可用状态。 $\lambda_{I,II}$ 是两元件同时开始故障转移率, $\mu_{I,II}$ 是同时修复率转移率(图 2)。对串联系统, 一元件故障后系统停运, 另一元件不可能继续故障, 只有两个元件同时故障才能达到状态 4。实际同时故障发生几率极小, 状态 4 可忽略不计。

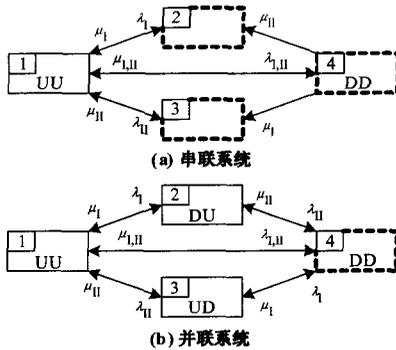


图 1 两元件系统状态转移

Fig.1 State transition for two-component system

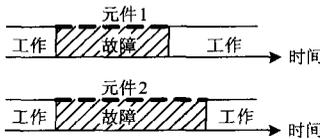


图 2 两元件同时开始故障

Fig.2 Simultaneous failure of two components

3.1 稳态不可用率误差

分别按串并联等值和状态转移矩阵, 得到稳态不可用率式(17)和式(18)。比较发现, 两种算法得到的系统不可用率, 对并联系统相等, 对串联系统不相等。按串联组合得到的系统不可用率, 实际上是状态 2、3、4 概率之和, 但图 1(a)中状态 4 极少可能发生。类似串联结构在大型发输电系统中很多, 如电厂中单元接线的发电机和升压变压器等, 一定运行方式下的母联断路器和出线断路器等。

$$\begin{cases} U_s = \frac{\lambda_I \lambda_{II} + \lambda_I \mu_{II} + \lambda_{II} \mu_I}{\lambda \lambda_I \lambda_{II} + \lambda_I \mu_{II} + \lambda_{II} \mu_I + \mu_I \mu_{II}} \\ U_p = \frac{\lambda_I}{\lambda_I + \mu_I} \frac{\lambda_{II}}{\lambda_{II} + \mu_{II}} \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} U_s = \frac{\lambda_I \mu_{II} + \lambda_{II} \mu_I}{\lambda_I \mu_{II} + \lambda_{II} \mu_I + \mu_I \mu_{II}} \\ U_p = \frac{\lambda_I}{\lambda_I + \mu_I} \frac{\lambda_{II}}{\lambda_{II} + \mu_{II}} \end{cases} \quad (18)$$

取 k 个同型元件串联系统, 令 $g = \lambda/\mu$, 两种方法得到的稳态不可用率见式(19), 相对误差 $U_{err,s}(\%)$ 见式(20)。图 3 表明, 由于多串联元件故障发生不完全独立, 按串联组合得到的可靠性指标, 确实夸大了系统不可用度。相应误差可能存在于状态枚举算法、及序贯和非序贯概率抽样。

$$\begin{cases} U_s = \frac{k\lambda}{k\lambda + \mu} = \frac{kg}{kg + 1} \\ U_s = 1 - \left(1 - \frac{\lambda}{\lambda + \mu}\right)^k = 1 - \left(1 - \frac{g}{g + 1}\right)^k \end{cases} \quad (19)$$

$$U_{err,s}(\%) = \frac{1 - \left(1 - \frac{g}{g + 1}\right)^k - \frac{kg}{kg + 1}}{\frac{kg}{kg + 1}} \times 100 \quad (20)$$

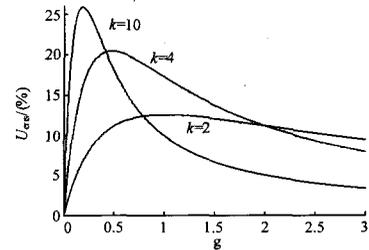


图 3 串联系统不可用率相对误差

Fig.3 Relative error of unavailability for series system

3.2 平均不可用率误差

对由多个串/并联元件组成的系统, 在有限评估周期内, 分别按整体状态空间和独自状态空间, 计算平均不可用率, 比较串并联等值误差。

3.2.1 两元件串联系统

若两元件串联, 状态初值可为 $(1, 0, 0)^T$ 、 $(0, 1, 0)^T$ 、 $(0, 0, 1)^T$ 。按串联关系直接计算在 $[0, \tau]$ 时间段内的平均不可用率式(21), 其中第一项为稳态部分, 第二、三项为时变部分, 与评估周期有关。

$$U[0, \tau] = \begin{cases} 1 - (1 - U(1,0)[0, \tau])^2 \\ 1 - (1 - U(1,0)[0, \tau])(1 - U(0,1)[0, \tau]) \\ 1 - (1 - U(0,1)[0, \tau])^2 \end{cases}$$

$$U[0, \tau] = \begin{cases} \frac{\lambda^2 + 2\lambda\mu}{(\lambda+\mu)^2} + \frac{2\mu\lambda}{(\lambda+\mu)^3} \tau \left[e^{-(\lambda+\mu)\tau-1} \right] - \frac{\lambda^2}{(\lambda+\mu)^4} \tau^2 \left[e^{-(\lambda+\mu)\tau-1} \right]^2 \\ \frac{\lambda^2 + 2\lambda\mu}{(\lambda+\mu)^2} + \frac{\lambda\mu - \mu^2}{(\lambda+\mu)^3} \tau \left[e^{-(\lambda+\mu)\tau-1} \right] + \frac{\lambda\mu}{(\lambda+\mu)^4} \tau^2 \left[e^{-(\lambda+\mu)\tau-1} \right]^2 \\ \frac{\lambda^2 + 2\lambda\mu}{(\lambda+\mu)^2} + \frac{\lambda\mu - \mu^2}{(\lambda+\mu)^3} \tau \left[e^{-(\lambda+\mu)\tau-1} \right] + \frac{\lambda\mu}{(\lambda+\mu)^4} \tau^2 \left[e^{-(\lambda+\mu)\tau-1} \right]^2 \end{cases} \quad (21)$$

相同初值下按式(15)计算平均不可用率式(22)。与式(21)相比, 平均不可用率的稳态及时变部分都存在较大误差。

$$U[0, \tau] = \begin{cases} \frac{2\lambda}{2\lambda+\mu} + \frac{2\lambda}{(2\lambda+\mu)^2} \tau \left[e^{-(2\lambda+\mu)\tau-1} \right] \\ \frac{2\lambda}{2\lambda+\mu} - \frac{\mu}{(2\lambda+\mu)^2} \tau \left[e^{-(2\lambda+\mu)\tau-1} \right] \\ \frac{2\lambda}{2\lambda+\mu} - \frac{\mu}{(2\lambda+\mu)^2} \tau \left[e^{-(2\lambda+\mu)\tau-1} \right] \end{cases} \quad (22)$$

3.2.2 两元件并联系统

若两元件并联, 状态初值可为(1, 0, 0, 0)^T、(0, 1, 0, 0)^T、(0, 0, 1, 0)^T、(0, 0, 0, 1)^T。按并联关系, 直接计算在[0, τ]时间段内的平均不可用率:

$$U[0, \tau] = \begin{cases} (U_{(1,0)}[0, \tau])^2 \\ (U_{(1,0)}[0, \tau])(U_{(0,1)}[0, \tau]) \\ (U_{(0,1)}[0, \tau])(U_{(1,0)}[0, \tau]) \\ (U_{(0,1)}[0, \tau])^2 \end{cases} = \begin{cases} \frac{\lambda^2}{(\lambda+\mu)^2} + \frac{2\lambda^2}{(\lambda+\mu)^3} \tau \left[e^{-(\lambda+\mu)\tau-1} \right] + \frac{\lambda^2}{(\lambda+\mu)^4} \tau^2 \left[e^{-(\lambda+\mu)\tau-1} \right]^2 \\ \frac{\lambda^2}{(\lambda+\mu)^2} + \frac{\lambda^2 - \lambda\mu}{(\lambda+\mu)^3} \tau \left[e^{-(\lambda+\mu)\tau-1} \right] - \frac{\lambda\mu}{(\lambda+\mu)^4} \tau^2 \left[e^{-(\lambda+\mu)\tau-1} \right]^2 \\ \frac{\lambda^2}{(\lambda+\mu)^2} + \frac{\lambda^2 - \lambda\mu}{(\lambda+\mu)^3} \tau \left[e^{-(\lambda+\mu)\tau-1} \right] - \frac{\lambda\mu}{(\lambda+\mu)^4} \tau^2 \left[e^{-(\lambda+\mu)\tau-1} \right]^2 \\ \frac{\lambda^2}{(\lambda+\mu)^2} - \frac{2\lambda\mu}{(\lambda+\mu)^3} \tau \left[e^{-(\lambda+\mu)\tau-1} \right] + \frac{\mu^2}{(\lambda+\mu)^4} \tau^2 \left[e^{-(\lambda+\mu)\tau-1} \right]^2 \end{cases} \quad (23)$$

相同初值下, 按系统整体计算平均不可用率式(24)。与式(23)相比, 平均不可用率的稳态部分相同, 时变部分第一项相同, 第二项差异较大。

$$U[0, \tau] =$$

$$U[0, \tau] = \begin{cases} \frac{\lambda^2}{(\lambda+\mu)^2} + \frac{2\lambda^2}{(\lambda+\mu)^3} \tau \left[e^{-(\lambda+\mu)\tau-1} \right] - \frac{\lambda^2}{2(\lambda+\mu)^3} \tau \left[e^{-2(\lambda+\mu)\tau-1} \right] \\ \frac{\lambda^2}{(\lambda+\mu)^2} + \frac{\lambda^2 - \lambda\mu}{(\lambda+\mu)^3} \tau \left[e^{-(\lambda+\mu)\tau-1} \right] + \frac{\lambda\mu}{2(\lambda+\mu)^3} \tau \left[e^{-2(\lambda+\mu)\tau-1} \right] \\ \frac{\lambda^2}{(\lambda+\mu)^2} + \frac{\lambda^2 - \lambda\mu}{(\lambda+\mu)^3} \tau \left[e^{-(\lambda+\mu)\tau-1} \right] + \frac{\lambda\mu}{2(\lambda+\mu)^3} \tau \left[e^{-2(\lambda+\mu)\tau-1} \right] \\ \frac{\lambda^2}{(\lambda+\mu)^2} - \frac{2\lambda\mu}{(\lambda+\mu)^3} \tau \left[e^{-(\lambda+\mu)\tau-1} \right] - \frac{\mu^2}{2(\lambda+\mu)^3} \tau \left[e^{-2(\lambda+\mu)\tau-1} \right] \end{cases} \quad (24)$$

综上所述, 短期可靠性分析中, 尽量避免用式(16)直接等值串并联系统的不可用率。

4 算例分析

以高压直流输电(HVDC)系统换流桥为例, 检验所提算法可行性。HVDC 系统由换流站和直流线路组成, 前者包括换流桥、换流变压器、交流滤波器、平波电抗器、附属设备、保护和控制等, 可按结构和功能划分为多个子系统予以分析。

4.1 换流桥状态空间

根据不同输电容量, 图 4 给出±800 kV 双极双桥特高压直流(UHVDC)输电系统换流站结构^[22], 可以是单 12 脉波(2 个换流桥, 每个换流桥有 6 个晶闸管阀臂), 也可以是串联或并联双 12 脉波(4 个换流桥)。当有一个阀臂故障时, 12 脉波换流桥停运后旁路, 待修复安装阀臂后重新运行。如果有备用阀臂, 可以用其替换故障阀臂, 减少停运时间。

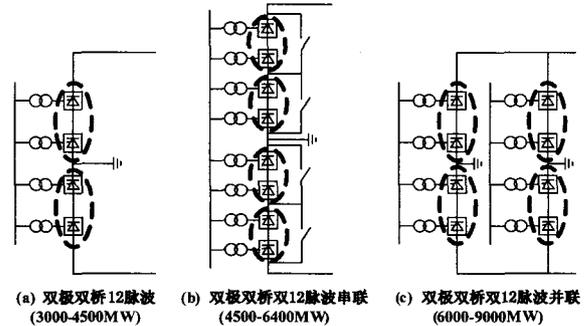


图 4 特高压直流输电系统换流器结构

Fig.4 Converter station for UHVDC transmission system

对双极双桥双 12 脉波串联换流桥, 考虑阀臂故障有 5 个容量等级: 1.0、0.75、0.5、0.25 和 0。只考虑单极换流桥时, 有 6 个状态、3 个容量等级: 0.5、0.25 和 0^[23]。图 5 给出了有 2 个备用阀臂时单极换流桥状态空间, 其中 λ_v、μ_v、γ_v 分别是阀臂故障率、修复率和替换率。各状态可用与否, 与线路载荷有关。考虑直流线路快速调节和短期过载能力, 认为零容量状态(8-12)为不可用状态。

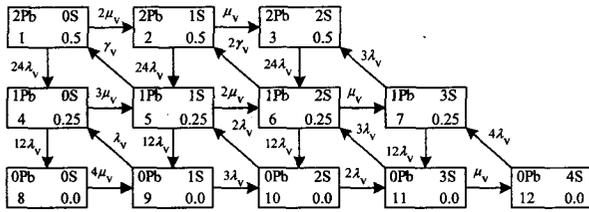


图 5 单极换流桥状态空间

Fig.5 State space for single-pole converter bridge

4.2 初始状态对不可用率的影响

以单极双桥双 12 脉波串联换流桥结构为例, 取 $\lambda_v=0.6 \times 10^{-5}$ 次/小时, $\mu_v=0.05$ 次/小时, $\gamma_v=0.5$ 次/小时。稳态状态概率见表 1。

表 1 稳态状态概率

Tab.1 Steady-state state probability

状态	状态概率	状态	状态概率
1	3.3557×10^{-6}	7	4.5599×10^{-6}
2	0.002735	8	1.2489×10^{-12}
3	0.9971	9	7.4833×10^{-11}
4	3.4692×10^{-9}	10	8.9646×10^{-9}
5	6.7211×10^{-7}	11	7.9018×10^{-10}
6	1.3680×10^{-4}	12	1.9754×10^{-11}

从不同初始状态, 图 6 给出了状态概率随时间的变化。结果表明: 从可用初始状态出发, 不可用率先增大, 再逐渐减小至稳态值; 从不可用初始状态出发, 单调减小至稳态值。初始状态越不可靠(如状态 4 和 8), 其瞬时状态概率衰减至稳态值的时间越长。当瞬时状态概率随时间明显变化时, 需要根据给定可靠性评估时段予以描述。

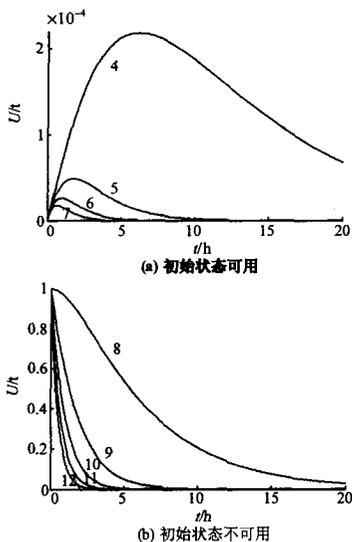


图 6 不同初始状态下的不可用率

Fig.6 Instantaneous unavailability with initial states

稳态可靠性分析中一般假设备用元件可用。但是备用元件的故障属于非显性故障, 往往要等到替换时, 才知道其可用与否。因此在初始状态中备用元件初值状态可能是概率数值。初始状态下, 假设 2 个备用元件都可用的概率为 0.8, 有 1 个不可用的概率为 0.2。此时概率状态初值为 $(0, 0.2, 0.8, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)^T$ 。图 7 给出了换流桥的不可用率随时间的变化, 并与确定状态初值 $(0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)^T$ 进行了比较。结果表明, 备用元件的可信程度, 直接影响柔性输电设备的可靠性水平。

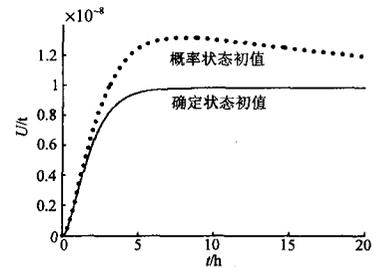


图 7 概率初始状态下的瞬时不可用率

Fig.7 Instantaneous unavailability with probabilistic initial state

4.3 评估周期对不可用率的影响

表 2 给出不同时段 $[0, \tau]$ 下的平均不可用率。结果表明, 可靠性评估时间跨度, 对不可用率结果影响非常明显, 因此在短期可靠性分析中, 需要明确评估时间起点和评估周期。

表 2 不同评估周期下的平均不可用率

Tab.2 Average unavailability with evaluation periods

初始状态	$\tau=0.5h$	$\tau=4h$	$\tau=24h$
1	4.3022×10^{-10}	2.3093×10^{-8}	1.4625×10^{-7}
2	3.8085×10^{-10}	1.0240×10^{-8}	2.0817×10^{-8}
3	3.3817×10^{-10}	5.3240×10^{-9}	9.0260×10^{-9}
4	1.7913×10^{-5}	1.1758×10^{-4}	1.3186×10^{-4}
5	1.5213×10^{-5}	3.8453×10^{-5}	9.4085×10^{-6}
6	1.2966×10^{-5}	1.5685×10^{-5}	2.8521×10^{-6}
7	1.1090×10^{-5}	7.8083×10^{-6}	1.3314×10^{-6}
8	0.996 1	0.851 6	0.279 2
9	0.882 4	0.402 5	0.073 5
10	0.785 6	0.239 0	0.040 4
11	0.703 0	0.165 0	0.027 6
12	0.632 1	0.125 0	0.020 8

5 结论

本文初步研究了柔性输电设备短期可靠性评估算法, 得到以下结论:

- (1) 瞬时状态概率与初始状态有关。平均不可

用率与初始状态和可靠性评估周期有关。

(2) 直接串联等值得到的稳态不可用率存在误差。串并联等值得到的平均不可用率存在误差。

(3) 冷备用元件故障为非暴露性，其状态初值具有一定不确定性，可用概率状态初值予以描述。

参考文献

[1] Urbanek J, Piwko R J, Larsen E V, et al. Thyristor Controlled Series Compensation Prototype Installation at the Slatt 500 kV Substation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(3): 1460-1469.

[2] 郭剑波, 武守远, 李国富, 等. 甘肃成碧 220kV 可控串补国产化示范工程研究[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 12 - 17.

GUO Jian-bo, WU Shou-yuan, LI Guo-fu, et al. Study on Domestic- Manufactured Demo Project of 220kV TCSC for Power Transmission from Cheng County to Bikou in Gansu Province[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 12-17.

[3] Hingorani N G, Gyugyi L. Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems[M]. NY: IEEE Press, 2000.

[4] Mathur R M, Varma R K. Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems[M]. NY: IEEE/Wiley, 2002.

[5] 李兴源. 高压直流输电系统的运行与控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

LI Xing-yuan. Operation and Control to HVDC Transmission System[M]. Beijing: Science Press, 1998.

[6] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

XU Zheng. Dynamic Performance Analysis for AC/DC Power Systems[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.

[7] 鲁宗相, 刘文华, 王仲鸿. 基于 k/n(G)模型的 STATCOM 装置可靠性分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(13): 12-17.

LU Zong-xiang, LIU Wen-hua, WANG Zhong-hong. Reliability Evaluation of STATCOM based on the k-out-of-n: G Model[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(13): 12-17.

[8] 任震, 黄雯莹, 冉立. 高压直流输电系统可靠性评估 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.

REN Zhen, HUANG Wei-ying, RAN Li. Reliability Analysis for HVDC Transmission Systems[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1996.

[9] Billinton R, Fotuhi-Firuzabad M, Faried S O. Power System Reliability Enhancement Using a Thyristor Controlled Series Capacitor[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(1): 369-374.

[10] Fotuhi-Firuzabad M, Billinton R, Faried S O. Subtransmission System Reliability Enhancement Using

a Thyristor Controlled Series Capacitor[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(1): 443-449.

[11] Billinton R, Ahluwalia D S. Incorporation of a DC Link in a Composite System Adequacy Assessment - DC System Modelling[J]. IEE Proc Gener, Transm & Distrib, 1992, 139(3): 211-220.

[12] 刘海涛, 程林, 孙元章, 等. 交直流系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2004, 28(23): 27-31.

LIU Hai-tao, CHENG Lin, SUN Yuan-zhang, et al. Reliability Evaluation of Hybrid AC/DC Power Systems [J]. Power System Technology, 2004, 28(23): 27-31.

[13] 刘威, 赵渊, 周家启, 等. 高压直流输电系统单双 12 脉接线可靠性对比研究[J]. 继电器, 2008, 36(9): 29 - 34.

LIU Wei, ZHAO Yuan, ZHOU Jia-qi, et al. Comparison and Research on the Reliability between the 12-Pulse and 2x12-Pulse HVDC Transmission System[J]. Relay, 2008, 36(9): 29-34.

[14] Billinton R, Sankarakrishnan A. Adequacy Assessment of Composite Power Systems with HVDC Links using Monte Carlo Simulation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1626-1633.

[15] 王遂, 任震, 蒋金良. 混合法在高压直流输电系统可靠性评估中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(12): 42-46.

WANG Sui, REN Zhen, JIANG Jin-liang. Application of Hybrid Reliability Evaluation Method for HVDC Transmission Systems[J]. Power System Technology, 2007, 31(12): 42-46.

[16] 李生虎, 丁明. 电力市场中基于电价弹性的电力系统运行可靠性的协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 34-40.

LI Sheng-hu, DING Ming. Coordination to Power System Operational Reliability in Power Market based on Price Elasticity[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 34-40.

[17] 王成亮, 赵渊, 周家启, 等. 基于日发电计划的电力系统运行风险概率评估[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 6 - 10.

WANG Cheng-liang, ZHAO Yuan, ZHOU Jia-qi, et al. Probabilistic Evaluation of Power System Operational Risk based on Daily Generation Scheduling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 6-10.

[18] 孙元章, 刘海涛, 程林, 等. 运行可靠性在线短期评估方案[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 4-8.

SUN Yuan-zhang, LIU Hai-tao, CHENG Lin, et al. A Scheme for Online Short-term Operational Reliability Evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 4-8.

说明了变压器谐波损耗的原因, 即变压器负载损耗有两部分, 铜耗和涡流损耗, 铁芯损耗可以忽略。而涡流损耗系数又考虑了变压器的型式和容量取不同的数值。在变压器设计和选择时, 比较适合应用。

方法二是一种计算更为粗略的方法, 它需要对变压器进行实地测量, 测量数据相对简单, 然后粗略估计变压器出力下降百分数。它比较适用于估计已经投运的变压器出力下降的情况。

6 结论

在谐波扰动的情况下变压器会发生过热现象, 噪声变大, 不仅降低变压器出力, 而且会缩短变压器寿命, 因此非常有必要降低变压器出力, 限制负荷电流。利用五个地点的 10、0.4 kV 变压器的实测数据进行计算, 结果表明, 变压器出力下降为 98%~69.3% 不等。损耗增加 1.15~2.55 倍不等。第一种方法用于指导设计, 第二种方法用于已经运行的变压器。

参考文献

- [1] IEEE Std 519-1992: IEEE Recommended Practices Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems[S].
- [2] Wskileh G J. 电力系统谐波 基本原理、分析方法和滤波器设计 [M]. 徐政, 译. 北京: 机械工业出版社, 2003.89-92.
- [3] ANSI/IEEE std C57.110-1986: American National Standard Recommended Practice for Establishing Transformer Capability when Supplying Non-sinusoidal Load Currents[S].
- [4] Pierce L W. Transformer Design and Application Considerations for Nonsinusoidal Load Currents[J]. IEEE Trans on Industry Application, 1996,32(3).
- [5] Kenuedy S P, Ivey C L. Application, Design and Rating of Transformers Containing Harmonic Currents[A]. in: Conference Record of 1990 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference IEEE[C]. 1990.
- [6] 陈杰甫, 杨泓, 马旻雯, 等. 医院供配电系统谐波状况普查与 K 系数研究[J]. 电气工程应用, 2007,(4):25-29.
- [7] Suechoey B, Tadsuan S, Khluabwannarat P, et al. An Analysis of Total Loss and Temperature of Oil-immersed Transformer with Short Circuit Test Linear Load and Non-linear Load[A]. in: The 7th International Power Engineering Conference, IPEC 2005[C]. 2005.643 - 647.
- [8] 刘坤, 高钟毓, 韩丰田. 容性负载方波调制高压变压器的设计[J]. 清华大学学报, 2007,47(2):15-18. LIU Kun, GAO Zhong-yu, HAN Feng-tian. Design of Squire-wave Modulated High-voltage Transformer with Capacitive Load[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2007,47(2):15-18.
- [19] 孙元章, 程林, 刘海涛. 基于实时运行状态的电力系统运行可靠性评估[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 6-12. SUN Yuan-zhang, CHENG Lin, LIU Hai-tao. Power System Operating Reliability Evaluation Based on Real-time Operating State[J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 6-12.
- [20] IEEE Std 1240-2000(R2006). IEEE Guide for the Evaluation of the Reliability of HVDC Converter Stations[S]. 2006.
- [21] 翟永昌. 高压直流输电极控系统冗余配置分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(2): 88-89,95. ZHAI Yong-chang. Analysis of Pole Control Redundant Configure in HVDC Project[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(2): 88-89,95.
- [22] Asplund G, Astrom U, Lescale V. 800 kV HVDC for Transmission of Large Amount of Power over Very Long Distances[A]. in: Proc International Conference on Power System Technology[C]. 2006. 1-10.
- [23] 陈炜骏, 周家启, 刘洋, 等. 特高压双 12 脉波直流换流站系统可靠性评估[J]. 电气应用, 2007, 26(12): 36-41. CHEN Jun-wei, ZHOU Jia-qi, LIU Yang, et al. Ultra HVDC Converter System Reliability Evaluation[J]. Electrotechnical Application, 2007, 26(12): 36-41.

收稿日期: 2008-11-14; 修回日期: 2008-12-22

作者简介:

王葵 (1966-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统自动化、电力系统继电保护;

商莹 (1984-), 女, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护. E-mail: shangying@mail.sdu.edu.cn

收稿日期: 2009-06-22

作者简介:

李生虎 (1974-), 男, 博士, 研究员, 研究方向为电力系统运行与控制、柔性输电、风力发电; E-mail: shenghuli@hfut.edu.cn

刘正楷 (1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制、风力发电;

崔芳 (1988-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统可靠性。