计及异常状态和定期检修的UPFC可靠性评估

李生虎[1,2],胡 涛[1,2],常雅玲[1,2]
(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院,安徽 合肥 230009;
2. 新能源利用与节能安徽省重点实验室,安徽 合肥 230009)

摘要:统一潮流控制器(UPFC)可用与否受其元件可靠性及检修策略的影响。根据元件突发性故障比例,提出一种计及异常状态的元件转移率计算方法,并建立计及异常状态和定期检修的UPFC状态空间模型。建立UPFC可靠性对元件故障率的灵敏度模型以确定薄弱元件,进而量化定期检修参数对UPFC可靠性的影响。根据灵敏度模型分析结果确定了UPFC薄弱元件,量化了计及异常状态和定期检修后UPFC可靠性,分析了突发性故障比例和从异常状态到故障状态比例对UPFC可靠性的影响。通过与摄动法进行比较,验证了计及定期检修UPFC可靠性灵敏度分析方法的正确性。

关键词:统一潮流控制器;可靠性;异常状态;定期检修;灵敏度分析
中图分类号:TM 72 **文献标志码:**A DOI:10.16081/j.epae.202201026

0 引言

随着电网规模扩大和电力需求增加,电力系统潮流控制难度增加。统一潮流控制器(UPFC)通过控制母线电压、线路功率来调节电网潮流。目前,国内外至少有6个UPFC投入运行,其中2017年投运的苏南500 kV UPFC,其容量为3×250 MV·A,是世界上电压等级最高、容量最大的UPFC。考虑UPFC潮流控制和动态响应能力,提高UPFC可靠性有利于维持电网安全稳定运行[1-2]。

设备可靠性评估方法包括蒙特卡罗抽样、故障树、状态空间等。UPFC由串联换流器、串联变压器、并联换流器、并联变压器、直流电容和控制系统等多个元件组成,存在静止同步串联补偿器(SSSC)、静止同步补偿器(STATCOM)、UPFC等运行模式,因此状态空间法更适用于设备的可靠性评估。设备定期检修(RT)(以下简称"定检")可及时发现、消除设备隐患,减少故障发生,提高设备和电网可靠性。定检被广泛应用于继电保护、输电线路和其他输变电设备[3-5]。考虑设备内部老化特性以及外在人为因素对定检的影响[6-7],应用混合整数规划[8]、人工智能[9]等方法,确定定检周期。但是现有文献中未见计及定检的UPFC可靠性模型,其难点在于如下3个方面。

1)如何完善元件定检模型,确定状态转移率参数。元件故障分为突发性故障和劣化故障。前者与设备状态关系较弱,不受定检影响,如台风吹倒杆塔、挖掘机挖断线路等。后者为工作环境差、使用年限长等引起劣化最终导致故障。定检可减少后者发生概率。为求状态转移率,文献[10]采用时变停运模型,求解瞬时状态解。文献[11]通过大数据抽样计算状态转移率。文献[12]引入健康指数和役龄回退因子,计算劣化状态和检修后设备故障率。文献[13]将元件劣化过程分为多种状态,但是实际工程中不易区分。通过状态空间法推导状态转移率的解析表达及定检周期对其影响目前未见相关研究。

2)如何计及元件定检,拓展UPFC可靠性模型。文献[14]采用两状态模型,分析UPFC对电网可靠性影响,但忽略了UPFC内部结构。文献[15]基于频率与持续时间(F&D)算法考虑换流器降额运行,将UPFC等值为三状态模型。文献[16]考虑换流器独立运行,将UPFC等值为九状态模型。考虑检修成本,只能对较薄弱、故障后果较严重元件实行定检。文献[17]针对串联系统提出元件-系统分级优化检修策略。为避免UPFC可靠性下降,一般应尽量在所有元件完好时进行定检,由此影响状态间转移,对此未见研究。

3)如何计及薄弱元件异常状态和定检,提出UPFC灵敏度分析方法。文献[15]连续修改参数计算灵敏度,但是计算量大、效率低。文献[16]推导状态概率的灵敏度解析表达式。考虑定检后元件不再是两状态模型,因此在UPFC灵敏度分析中,不仅要考虑底层元件对UPFC可靠性的灵敏度,还要考虑定检参数对元件可靠性参数的影响,导致可靠性灵敏度算法更加复杂,对此也未见研究。

本文提出了一种计及元件异常状态和定检的UPFC可靠性模型及其灵敏度分析方法。首先给出现有UPFC可靠性模型,对其进行灵敏度分析,以确定需要定检的薄弱元件。然后根据元件突发性故障

收稿日期:2021-08-12;**修回日期:**2021-11-29
在线出版日期:2022-01-28
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877061);国家电网公司总部科技项目(52170221000U)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877061) and the Science and Technology Project of SGCC(52170221000U)

比例，提出一种计及异常状态的元件故障转移率计算方法，进一步引入定检，量化定检周期对元件故障转移率的影响。计及元件异常状态和定检，建立UPFC状态空间模型，并设计一种描述元件定检参数对UPFC可靠性影响的灵敏度方法。最后在算例分析中，根据灵敏度分析结果确定UPFC薄弱元件，量化计及薄弱元件异常状态和定检的UPFC的可靠性，分析突发性故障比例和从异常到故障状态比例对UPFC可靠性的影响。

1　现有UPFC可靠性及灵敏度模型

1.1　UPFC结构

UPFC结构如图1所示。UPFC由并联换流器VSC_1和串联换流器VSC_2组成，直流侧通过电容组（CG）相连，交流侧通过并联变压器（TM_1）和串联变压器（TM_2）分别连接母线和线路。并联侧VSC_1和TM_1构成子系统S_1，串联侧VSC_2和TM_2构成子系统S_2，控制系统（CS）和CG公共部分构成子系统S_3。两侧换流器共同工作时实现UPFC功能（简称UC）；VSC或TM故障，所属子系统失效，UPFC退化，实现STATCOM功能（简称SM）或SSSC功能（简称SC）；CS或CG故障，UPFC停运[18]。

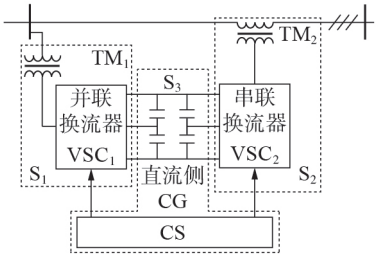


图1　UPFC结构

Fig.1　Configuration of UPFC

1.2　UPFC状态空间建模

首先建立换流器通用模型。换流器由2个换流桥（b）并联构成，每个桥由n_v个阀（v）组成，除此以外换流器附加n_{bu}个备用阀[16]。不考虑备用阀，任一阀故障导致该换流桥故障，换流器单桥运行，运行容量下降了50%；若2个换流桥均故障，运行容量为0。当换流器采用模块化多电平换流器（MMC）技术时，需将阀模型转换为MMC子模块模型，阀数量增加，本文所提可靠性建模方法仍然适用于该情况[19]。

合并具有相同运行容量的状态模型，对换流器进行等值建模，并对等值后的状态模型进行转移率计算，所得换流器状态空间见附录A图A1。将换流器等值模型与TM组合，考虑S_1、S_2结构相同，可得两系统组合后状态空间$S_{1/2}$，见附录A图A2（a）。同理，组合CG和CS得子系统S_3模型，见附录A图A2（b）。

组合3个子系统等值模型，可得UPFC状态空间，见附录A图A3。将运行容量为0的状态9—17合并，可得等值后的UPFC九状态模型。设ξ_{SM}为并联侧换流器单独运行容量；ξ_{SC}为串联侧单独运行容量；ξ_{UC}为2个换流器共同运行时的容量，任一换流器的运行容量下降了50%，则$\xi_{UC}=0.5$，任一换流器运行容量为0，则$\xi_{UC}=0$。等值前、后UPFC的换流器运行容量见附录A表A1。综合考虑换流器单独运行和共同工作，且实际串、并联侧换流器容量通常相同，故单侧换流器权重为0.5，则UPFC设备的运行容量$\xi_{EQ}=0.5(\xi_{SM}+\xi_{SC})$。

由于UPFC各状态的运行容量不同，状态概率不能直接相加。采用运行容量加权的方式，定义可用率A为状态概率乘以对应运行容量的和，未计及定检时UPFC分别实现UC、SM、SC功能及UPFC设备的可用率A_{UC0}、A_{SM0}、A_{SC0}及A_0的表达式见式（1）。

$$\begin{cases} A_{UC0}=P_{10}+0.5(P_{20}+P_{40}+P_{50}) \\ A_{SM0}=P_{10}+P_{40}+P_{70}+0.5(P_{20}+P_{50}+P_{80}) \\ A_{SC0}=P_{10}+P_{20}+P_{30}+0.5(P_{40}+P_{50}+P_{60}) \\ A_0=P_{10}+0.75(P_{20}+P_{40})+ \\ \quad 0.5(P_{30}+P_{50}+P_{70})+0.25(P_{60}+P_{80}) \end{cases} \tag{1}$$

式中：$P_{i0}(i=1,2,\cdots,8)$为未计及定检时UPFC状态i的状态概率。

1.3　未计及定检时确定UPFC薄弱元件的灵敏度算法

换流阀故障影响串、并联换流器可用与否。换流器、变压器、直流电容、控制系统故障影响UPFC可用与否。若能发现对UPFC可靠性影响较大的薄弱元件，对其进行定检，即可改善UPFC可靠性。建立UPFC可靠性指标对元件可靠性参数的灵敏度模型，以确定薄弱元件。

根据附录A图A3所示UPFC状态空间，建立状态转移率矩阵$\boldsymbol{G}_0=[g_{ij}]_{n\times n}$（$n$为状态数，$g_{ij}$为状态转移率矩阵中的元素），由式（2）可得未计及定检时UPFC状态概率矩阵$\boldsymbol{P}_0=[P_{10},P_{20},\cdots,P_{n0}]^{\mathrm{T}}$。

$$\begin{cases} \boldsymbol{G}_0^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_0=0 \\ \sum_{i=1}^{n}P_{i0}=1 \end{cases} \tag{2}$$

合并相同运行容量的状态空间，可简化计算，减少人工查找状态出现的错误。对于复杂系统，F&D算法难以建立等值后状态概率的解析表达式，且人工查找容易出错。本文基于文献[20]所提出的矩阵形式F&D算法，用于特高压直流输电系统等值。以附录A图A2（a）为例，根据频率守恒及等值前后状态概率相等，将运行容量相同的状态3—5合并，将五状态模型等值为三状态模型，建立式（3）所示等值前后状态对应矩阵$\boldsymbol{M}$，进而可得式（4）所示等值后状

态概率矩阵 $\boldsymbol{P}_0'$ 和式(5)所示等值后状态转移率矩阵 $\boldsymbol{G}_0'$。

$$\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix}1&0&0&0&0\\0&1&0&0&0\\0&0&1&1&1\end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{P}_0'=\boldsymbol{M}\boldsymbol{P}_0 \tag{4}$$

$$\boldsymbol{G}_0'=(\boldsymbol{M}\mathrm{diag}(\boldsymbol{P}_0)\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}})^{-1}\boldsymbol{M}\mathrm{diag}(\boldsymbol{P}_0)\boldsymbol{G}_0\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

下面求解等值前后状态转移率矩阵和状态概率对可靠性参数 x(故障率 λ、修复率 μ、安装率 γ 等)的灵敏度。将 $\boldsymbol{G}_0^{\mathrm{T}}$ 第 n 行替换为1,可得矩阵 $\boldsymbol{D}$。根据式(2)有 $\boldsymbol{D}\boldsymbol{P}_0=\boldsymbol{E}$,其中 $\boldsymbol{E}=[0,0,\cdots,1]^{\mathrm{T}}$。对 x 求导,可得等值前状态概率的灵敏度为:

$$\frac{\partial \boldsymbol{P}_0}{\partial x}=-\boldsymbol{D}^{-1}\frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial x}\boldsymbol{D}^{-1}\boldsymbol{E} \tag{6}$$

对式(4)、(5)求导,可得到等值后状态概率灵敏度和状态转移率矩阵灵敏度分别为:

$$\frac{\partial \boldsymbol{P}_0'}{\partial x}=\boldsymbol{M}\frac{\partial \boldsymbol{P}_0}{\partial x} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \boldsymbol{G}_0'}{\partial x}=&\frac{\partial\left[(\boldsymbol{M}\mathrm{diag}(\boldsymbol{P}_0)\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}})^{-1}\boldsymbol{M}\mathrm{diag}(\boldsymbol{P}_0)\boldsymbol{G}_0\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}}\right]}{\partial x}=\\&(\mathrm{diag}(\boldsymbol{P}_0'))^{-1}\boldsymbol{M}\left(\frac{\partial\mathrm{diag}(\boldsymbol{P}_0)}{\partial x}\boldsymbol{G}_0+\mathrm{diag}(\boldsymbol{P}_0)\frac{\partial \boldsymbol{G}_0}{\partial x}\right)\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}}-\\&(\mathrm{diag}(\boldsymbol{P}_0'))^{-1}\boldsymbol{M}\frac{\partial\mathrm{diag}(\boldsymbol{P}_0)}{\partial x}\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}}(\mathrm{diag}(\boldsymbol{P}_0'))^{-1}\times\\&\boldsymbol{M}\mathrm{diag}(\boldsymbol{P}_0)\boldsymbol{G}_0\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}}\end{aligned} \tag{8}$$

式中:$\mathrm{diag}(\boldsymbol{P}_0')=\boldsymbol{M}\mathrm{diag}(\boldsymbol{P}_0)\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}}$。

根据等值过程,由下向上即可建立确定UPFC薄弱元件的灵敏度算法模型,算法步骤见附录A图A4。

2 计及异常状态和定检拓展元件模型

2.1 计及异常状态的元件可靠性模型

当元件处于异常状态时,其劣化为故障状态的可能性更大,仅以常规的状态概率评估元件可靠性不够准确。因此建立考虑异常状态的元件可靠性模型,将正常运行状态(UP)分为完好状态(GD)和异常状态(DU),以区分突发性故障(由完好直接至故障状态(DN))和劣化故障(由GD劣化至DU再至DN)。未计及元件安装过程与计及其安装过程时考虑异常状态的元件可靠性状态空间模型分别见附录A图A5(a)、(b)。

该模型存在如下问题:①运行部门对中间状态(DU)不感兴趣;②不易获取异常状态转移率。实际中可以统计未计及定检时元件的故障率 λ_0、修复率 μ_0 和安装率 γ_0,但是不易区别元件的完好状态和异常状态,因此未计及定检时元件由GD到DU的故障率 λ_{DU0}、由DU到DN的故障率 λ_{DN0} 和由GD到DN的故障率 λ_{SF0} 未知。λ_0、μ_0、γ_0 代入式(2)可得元件等值后正常运行状态、故障状态和待安装状态(I)的状态概率 P_{UP0}、P_{DN0} 和 P_{I0}。设 k 为由外因引起的元件突发性故障比例,则 $\lambda_{\mathrm{SF0}}=k\lambda_0$,由GD到DU再到DN的状态转移率为 $(1-k)\lambda_0$。考虑异常状态未必都发展为故障,则存在如下约束条件:

$$\lambda_{\mathrm{DU0}}>(1-k)\lambda_0 \tag{9}$$

定义系数 m($m<1$)以量化元件由GD发展到DU可能性,则有:

$$\lambda_{\mathrm{DU0}}=\frac{(1-k)\lambda_0}{m} \tag{10}$$

由等值前后状态概率相等可得:

$$P_{\mathrm{GD0}}+P_{\mathrm{DU0}}=P_{\mathrm{UP0}} \tag{11}$$

式中:P_{GD0}、P_{DU0} 分别为未计及定检时元件完好状态、异常状态的状态概率。由等值前后转移至DN的频率相等可得:

$$\lambda_{\mathrm{SF0}}P_{\mathrm{GD0}}+\lambda_{\mathrm{DN0}}P_{\mathrm{DU0}}=\lambda_0P_{\mathrm{UP0}} \tag{12}$$

由DU的频率平衡原则可得:

$$\lambda_{\mathrm{DU0}}P_{\mathrm{GD0}}=\lambda_{\mathrm{DN0}}P_{\mathrm{DU0}} \tag{13}$$

联立式(11)—(13),代入 λ_{SF0}、λ_{DU0},得到 λ_{DN0}、P_{GD0} 和 P_{DU0} 的表达式分别为:

$$\lambda_{\mathrm{DN0}}=\frac{\lambda_0}{1-m} \tag{14}$$

$$P_{\mathrm{GD0}}=\frac{m}{(1-m)(1-k)+m}P_{\mathrm{UP0}} \tag{15}$$

$$P_{\mathrm{DU0}}=\frac{(1-m)(1-k)}{(1-m)(1-k)+m}P_{\mathrm{UP0}} \tag{16}$$

2.2 计及定检的元件可靠性模型

元件一般只在UP(GD或DU)时进行定检,然后修复至GD。计及异常状态后,计及定检的元件可靠性模型见图2。图中:λ_{RT}、μ_{RT} 分别为定检率和定检修复率,$\lambda_{\mathrm{RT}}=1/T_{\mathrm{RT}}$,$T_{\mathrm{RT}}$ 为定检周期;状态框左上角数值表示状态序号,右上角数值表示运行容量。

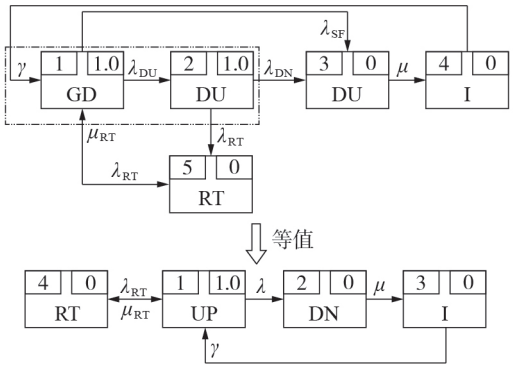


图2 计及定检的元件状态空间模型

Fig.2 State space model of component with routine test

为确定计及定检元件转移率和定检周期间关系,给出以下4种假设:①突发性故障与元件运行状

态无关，不受定检影响，即$\lambda_{SF}=\lambda_{SF0}$（$\lambda_{SF}$为计及定检时元件由GD到DN的故障率）；②当$T_{RT}$很小，状态在RT、GD间转换，基本不会发展至DU，计及定检时元件由GD到DU的故障率λ_{DU}和由DU到DN的故障率λ_{DN}接近于0；③当T_{RT}趋于无穷大时，等同于未计及定检情况；④λ_{DN}随着λ_{DU}相应改变。

实际工程中当T_{RT}接近元件正常运行时间T_{UP}（$T_{UP}=1/\lambda_0$）时，定检影响即可忽略不计，则：

$$\lambda_{DU}\approx\lambda_{DU0}\quad T_{RT}\rightarrow T_{UP} \tag{17}$$

$$\lambda_{DN}\approx\lambda_{DN0}\quad T_{RT}\rightarrow T_{UP} \tag{18}$$

假设②、③下元件状态发展的变化趋势相同，以比例系数c描述元件由GD到DU再到DN的过程，则有：

$$\lambda_{DU}=c\lambda_{DU0} \tag{19}$$

$$\lambda_{DN}=c\lambda_{DN0} \tag{20}$$

$$c=\begin{cases}\dfrac{T_{RT}}{T_{UP}} & \dfrac{T_{RT}}{T_{UP}}\leqslant 1\\ 1 & \dfrac{T_{RT}}{T_{UP}}>1\end{cases} \tag{21}$$

根据等值前可靠性模型列出计及定检的状态转移率矩阵$\boldsymbol{G}$，计算状态概率$\boldsymbol{P}$，从而得到等值后$\boldsymbol{G}'$、$\boldsymbol{P}'$。计及定检后元件故障率λ为UP与DN间的状态转移率g'_{12}，同理λ_{SF}、λ_{DU}和λ_{DN}同样可等价为状态转移率矩阵中的元素。

3　计及定检后UPFC可靠性和灵敏度模型

3.1　计及定检后UPFC状态空间拓展模型

当进行UPFC可靠性建模时，若将故障停运和定检停运视为一个状态，则仅需改变元件故障率，状态空间不变，但是这样不能明确定检对故障状态改善效果。下面基于元件等效故障率，区别故障停运和定检停运状态，分析元件定检对UPFC状态空间模型的影响。

对于换流器，仅在其全额运行时定检，并修复至正常运行且无备用阀故障状态，换流器待拓展状态空间模型见附录A图A6(a)。由图可知，换流器等值为四状态模型，状态4表征换流器定检。

对于变压器，在子系统可以全额或降额运行的情况下进行定检，并修复至对应状态。与换流器模型组合，得到子系统$S_{1/2}$待拓展状态空间模型见附录A图A6(b)。由图可知，子系统$S_{1/2}$等值为四状态模型，状态6表征换流阀定检，状态7、8均表示TM定检。

计及CG或CS元件定检，子系统S_3待拓展状态空间模型见附录A图A6(c)。由图可知，子系统S_3等值为三状态模型，状态3表示其定检，状态4、5分别表示CG、CS定检。

组合上述子系统模型，计及定检后UPFC待拓展状态空间模型见附录A图A7。由图可知，状态18—22为计及S_2定检新增状态，状态23—27为计及S_1定检新增状态。将状态21、22、26、27等值为故障停运。将计及S_3定检新增状态28—35等值为一个状态，可得等值后UPFC状态空间模型。表1为计及定检UPFC拓展状态等值前、后状态序号变化及对应的运行容量。

表1　计及定检时等值前、后UPFC的运行容量

Table 1　Operation capacity of UPFC before and after equivalence with routine test

等值前状态序号	等值后状态序号	ξ_{UC}	ξ_{SM}	ξ_{SC}	ξ_{EQ}
21、22、26、27	9	0	0	0	0
18	10	0	1.0	0	0.50
19	11	0	0.5	0	0.25
20	12	0	0	0	0
23	13	0	0	1.0	0.50
24	14	0	0	0.5	0.25
25	15	0	0	0	0
28—35	16	0	0	0	0

计及定检后UPFC分别实现UC、SM、SC功能及UPFC设备可用率A_{UC}、A_{SM}、A_{SC}及A的表达式见式(22)。

$$\begin{cases}A_{UC}=P_1+0.5(P_2+P_4+P_5)\\ A_{SM}=P_1+P_4+P_7+P_{10}+0.5(P_2+P_5+P_8+P_{11})\\ A_{SC}=P_1+P_2+P_3+P_{13}+0.5(P_4+P_5+P_6+P_{14})\\ A=P_1+0.75(P_2+P_4)+0.5(P_3+P_5+P_7+P_{10}+P_{13})+\\ \quad 0.25(P_6+P_8+P_{11}+P_{14})\end{cases} \tag{22}$$

式中：P_1为计及定检时UPFC状态1的状态概率，其他类似。

3.2　计及定检后UPFC对薄弱元件定检参数的灵敏度算法

计及定检，拓展薄弱元件异常状态和定检状态，建立对薄弱元件定检参数y（k、m、T_{RT}）的灵敏度。建立等值前状态转移率矩阵灵敏度$\partial\boldsymbol{G}/\partial y$，其中状态转移率矩阵中的元素$\lambda_{SF}$、$\lambda_{DU}$和$\lambda_{DN}$的灵敏度表达式见式(23)—(25)，其余转移率的灵敏度为0。代入式(8)得等值后转移率矩阵灵敏度，则计及定检后故障率灵敏度$\partial\lambda/\partial y=\partial g'_{12}/\partial y$，最终可建立计及定检后UPFC对薄弱元件定检参数的灵敏度算法模型。

$$\begin{cases}\dfrac{\partial\lambda_{SF}}{\partial k}=\lambda_0\\ \dfrac{\partial\lambda_{DU}}{\partial k}=-\dfrac{c\lambda_0}{m}\end{cases} \tag{23}$$

$$\begin{cases}\dfrac{\partial\lambda_{DU}}{\partial m}=-c\dfrac{(1-k)\lambda_0}{m^2}\\ \dfrac{\partial\lambda_{DN}}{\partial m}=c\dfrac{\lambda_0}{(1-m)^2}\end{cases} \tag{24}$$

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \lambda_{DU}}{\partial T_{RT}} = \dfrac{(1-k)\lambda_0^2}{m} & T_{RT} \leqslant T_{UP} \\ \dfrac{\partial \lambda_{DN}}{\partial T_{RT}} = \dfrac{\lambda_0^2}{1-m} & T_{RT} \leqslant T_{UP} \\ \dfrac{\partial \lambda_{RT}}{\partial T_{RT}} = -\dfrac{1}{T_{RT}^2} \end{cases} \tag{25}$$

4 算例分析

4.1 未计及定检时确定UPFC薄弱元件

附录A表A2为UPFC元件参数[16,20]。设$n_v=60$，$n_{bu}=0$。为计算方便，设串、并联换流器参数相同。附录A表A3、A4分别为UPFC状态概率和可用率指标。未计及定检时UPFC可用率指标对元件故障率的灵敏度如表2所示，表中$S_{1\text{-}v}$、$S_{2\text{-}v}$分别表示子系统S_1、S_2中的阀元件。由表可知，对元件故障灵敏度最高的均为阀元件。串联换流器控制线路有功、无功，影响较大，故将其阀元件作为薄弱元件进行定检以提高UPFC可靠性。

表2 UPFC可用率对元件故障率的灵敏度

Table 2 Sensitivity of availability of UPFC to failure rate of component

元件	对元件故障率的灵敏度			
	UC功能	SM功能	SC功能	UPFC设备
$S_{1\text{-}v}$	-5.307×10^{-2}	-5.390×10^{-2}	2.909×10^{-10}	-2.695×10^{-2}
T_1	-3.366×10^{-3}	-3.393×10^{-3}	1.212×10^{-9}	-1.697×10^{-3}
$S_{2\text{-}v}$	-5.307×10^{-2}	2.909×10^{-10}	-5.390×10^{-2}	-2.695×10^{-2}
T_2	-3.366×10^{-3}	1.212×10^{-9}	-3.393×10^{-3}	-1.697×10^{-3}
CG	-8.075×10^{-3}	-8.139×10^{-3}	-8.139×10^{-3}	-8.139×10^{-3}
CS	-7.851×10^{-4}	-7.913×10^{-4}	-7.913×10^{-4}	-7.913×10^{-4}

4.2 计及异常状态和定检对阀元件可靠性影响

设突发性故障比例k=0.1，m=0.9，由阀故障率λ_{v0}=0.14次/a可得λ_{DU0}=0.14次/a，λ_{SF0}=0.014次/a，λ_{DN0}=1.4次/a。$\lambda_{DN0}\approx10\lambda_{DU0}$，说明元件处于异常状态时故障可能性大幅增加。考虑异常状态前、后，阀元件状态概率见附录A表A5。发现考虑异常状态后，$P_{DU0}\approx9\%P_{UP0}$（P_{DU0}、P_{UP0}分别为未计及定检时元件异常状态、正常运行状态的状态概率）。从故障率和状态概率2个角度表明了异常状态对元件可靠性的影响，证实引入定检以减少异常状态的必要性。

根据图2建立计及定检后换流阀状态空间。取μ_{RT}=2 190次/a，阀元件处于正常、完好、异常和故障下的状态概率随T_{RT}的变化情况见图3。由图可知，m一定时，计及定检时元件完好状态的状态概率P_{GD}始终高于未计及定检时，而计及定检时元件异常状态的状态概率P_{DU}和故障状态的状态概率P_{DN}始终小于未计及定检时。

当T_{RT}较小时，元件定检停运的概率大幅增加，P_{GD}、P_{UP}非常小；随着T_{RT}增大，P_{GD}、P_{UP}分别在T_{RT}=1 999 h、T_{RT}=44 185 h达到极大值；随后定检作用减弱，P_{GD}逐渐减小趋近于未计及定检时；而P_{UP}先减小，随着定检周期大于元件正常运行时间后逐渐增大，最终同样趋近于未计及定检时的情况。P_{DU}、P_{DN}与T_{RT}呈正相关，T_{RT}越小，异常、故障下的状态概率越小。P_{UP}在P_{GD}的基础上考虑到P_{DU}，故P_{UP}达到极大值的T_{RT}较P_{GD}大。T_{RT}变化时，P_{UP}变化范围小于0.4%，但P_{GD}增加、P_{DU}和P_{DN}减小明显，这说明对阀元件进行定检后可改善UPFC运行的可靠性。

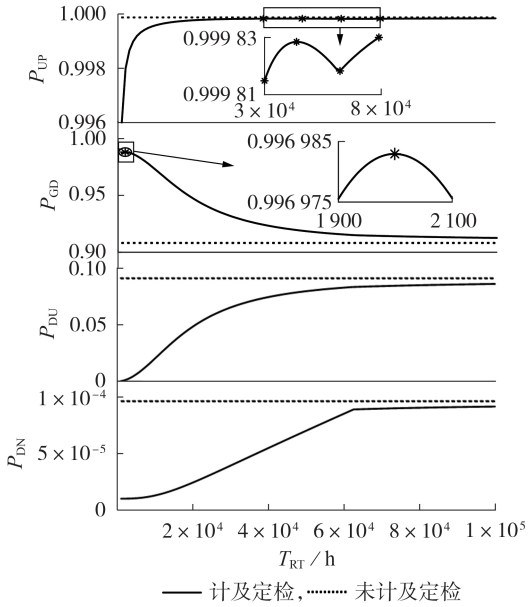


图3 定检前、后阀元件状态概率随T_{RT}的变化情况

Fig.3 State probabilities of valve with and without routine test v.s. T_{RT}

4.3 定检对UPFC可靠性影响

当k=0.1，m=0.9时，可得计及定检后阀元件的故障率，构建在串联换流器阀元件处施加定检的UPFC 12状态模型，分析T_{RT}对其可靠性影响。此时UPFC的可用率A_{SC}、A_{UC}和A均有所提高，且变化趋势相同；T_{RT}过小时由于串联换流器频繁定检停运，A_{SM}相对增大，但其增量较小可忽略不计。图4为定检前、后A随T_{RT}的变化情况。随着T_{RT}增加，A先增大后减小最后趋于平衡；T_{RT}过小时增加停运时间，设备可靠性降低；T_{RT}过大，定检作用减弱，A接近未加

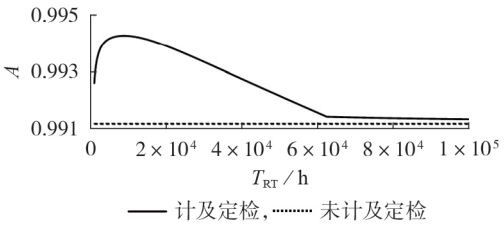


图4 定检前、后A随T_{RT}的变化情况

Fig.4 Variation of A with and without routine test v.s. T_{RT}

定检情况。以折线函数简化T_{RT}对元件转移率影响，故在$T_{RT}=T_{UP}=62\,571$ h处A存在转折，由减小趋于平衡。当$T_{RT}=8\,865$ h时，A达最大值，其值为0.994 3。此时UPFC状态概率和可用率分别见附录A表A6、A7。与表A4未计及定检结果相比，A_{SC}增加0.626%，A_{UC}增加0.631%，A增加0.313%。

UPFC可用率最大时，串联换流器阀元件的状态概率见表3，与未计及定检相比，阀元件处于完好状态的状态概率增加8%，处于异常状态下的状态概率减小80%，处于故障状态下的状态概率减小88%。

表3　未计及、计及定检可用率最大时阀元件的状态概率

Table 3　State probabilities of valve with routine test and maximum availability of UPFC

状态概率	指标值		状态概率	指标值	
	未计及定检	计及定检		未计及定检	计及定检
P_{GD}	0.9090	0.9831	P_{DN}	9.588×10^{-5}	1.166×10^{-5}
P_{DU}	0.0909	0.0164	P_{I}	3.196×10^{-5}	3.887×10^{-6}
P_{UP}	0.9999	0.9995	P_{RT}		4.510×10^{-4}

4.4　计及定检UPFC灵敏度计算分析

图5为$\partial A/\partial T_{RT}$、$\partial A/\partial k$和$\partial A/\partial m$随$T_{RT}$的变化情况。由于波形在$T_{RT}=T_{UP}$处存在转折点，且元件状态转移率在该转折点两侧的灵敏度不同，故UPFC可用率的灵敏度存在转折点，且经该转折点后趋近于未计及定检时的情况，由图可知，$\partial A/\partial T_{RT}$、$\partial A/\partial k$和$\partial A/\partial m$均逐渐趋近于0。

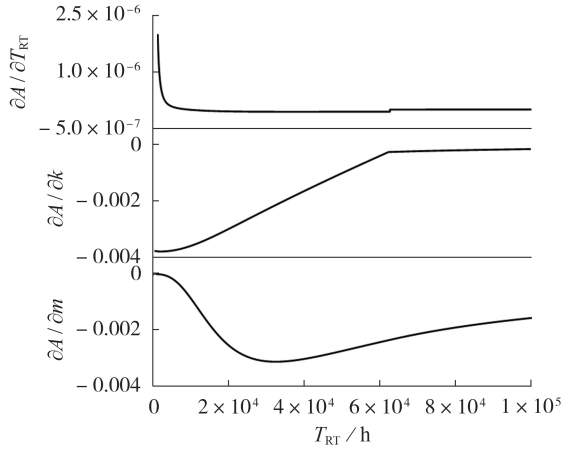


图5　$\partial A/\partial T_{RT}$、$\partial A/\partial k$和$\partial A/\partial m$随$T_{RT}$的变化情况

Fig.5　Variation of $\partial A/\partial T_{RT}$, $\partial A/\partial k$ and $\partial A/\partial m$ v.s. T_{RT}

当$T_{RT}<1\times10^4$ h时，$\partial A/\partial T_{RT}$迅速减小，$T_{RT}$变化对$\partial A/\partial T_{RT}$有较大影响。随$T_{RT}$增大，$\partial A/\partial T_{RT}$由正逐渐减小至0后，反向增大到极值，然后逐渐趋于0，即A趋于稳定值，与图4所示趋势一致。$\partial A/\partial k$和$\partial A/\partial m$始终小于0，故增大k或增大m，A均减小。

T_{RT}过小时，阀元件的故障主要为突发性故障，故$|\partial A/\partial k|$较高，又因为此时元件不会发展至异常状态，$|\partial A/\partial m|$随T_{RT}的减小而减小；随着T_{RT}增大，$|\partial A/\partial k|$逐渐减小，$|\partial A/\partial m|$先增大后减小；T_{RT}过大时，检修次数减少，$|\partial A/\partial m|$较小，此时系数m对A影响较小。

当T_{RT}=8 865 h时，UPFC可用率A最大，其对元件故障率的灵敏度见附录A表A8。由表可知，串联换流器阀元件故障率的灵敏度明显降低，这证明了串联换流器阀元件定检对UPFC可靠性的提升效果。

采用参数摄动法可得UPFC可用率与薄弱元件定检参数间的实际关系，将该实际结果与本文所提灵敏度模型得到的曲线相切，误差情况如附录A图A8所示，验证了计及定检情况下UPFC元件灵敏度分析方法的正确性。

5　结论

本文针对计及异常状态和定检的UPFC进行可靠性建模和灵敏度分析，得到以下结论：

1）相较完好状态，元件处于异常状态时故障可能性更大，即异常状态对元件可靠性影响很大，需要进行定检；

2）比较不同元件故障后果，串联换流器阀元件故障对UPFC可靠性影响最大，可视为薄弱元件，对其引入定检，以减小异常状态到故障比例，改善UPFC可靠性；

3）当定检周期为8 865 h时，UPFC可用率最大。相比未加定检时，A_{SC}、A_{UC}、A增加3%~6%，串联换流器阀元件完好概率增加近10%，异常和故障状态概率减少约80%，UPFC可用率指标对阀元件故障率的灵敏度大幅降低，证实了定检对UPFC可靠性的改善效果；

4）考虑阀元件故障可能导致UPFC降额运行，两者可用率最大时所对应的检修周期存在差异，前者约为后者的1/5。

附录见本刊网络版（http://www.epae.cn）。

参考文献：

[1] 李生虎，汪婷，吴东，等．基于初值估算和潮流可控范围的UPFC潮流收敛特性研究[J]．电力自动化设备，2018，38(12)：67-72.
LI Shenghu，WANG Ting，WU Dong，et al. Power flow convergence characteristic of UPFC based on initial value evaluation and controllable range of power flow[J]. Electric Power Automation Equipment，2018，38(12)：67-72.

[2] 李兴建，笃峻，姚婷婷，等．UPFC换流阀模块测试装置的研制及应用[J]．电力自动化设备，2018，38(12)：212-217.
LI Xingjian，DU Jun，YAO Tingting，et al. Research and application of sub-module test device for UPFC converter valve[J]. Electric Power Automation Equipment，2018，38(12)：212-217.

[3] 郭升，童晓阳．智能变电站线路保护系统检修周期的优化方法

研究[J]. 电网技术,2020,44(2):484-495.
GUO Sheng,TONG Xiaoyang. Research on optimization method of maintenance period for transmission line protection system in smart substation[J]. Power System Technology,2020,44(2):484-495.

[4] 张宏志,熊卫红,谢志成,等. 计及电网节点重要度的变压器检修排序方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(9):192-197.
ZHANG Hongzhi,XIONG Weihong,XIE Zhicheng,et al. Transformer maintenance scheduling method considering node importance of power grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(9):192-197.

[5] 赵洪山,李宇昊. 基于比例强度模型的变压器不完全检修策略[J]. 电力自动化设备,2021,41(6):179-183,191.
ZHAO Hongshan,LI Yuhao. Imperfect maintenance strategy of transformer based on proportional strength model[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(6):179-183,191.

[6] ZHONG J,LI W,WANG C,et al. Determining optimal inspection intervals in maintenance considering equipment aging failures[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2017,32(2):1474-1482.

[7] 暴英凯,王逸飞,文云峰,等. 考虑人为因素的设备可靠度评估及定检周期决策[J]. 电网技术,2015,39(9):2546-2552.
BAO Yingkai,WANG Yifei,WEN Yunfeng,et al. Equipment reliability evaluation and maintenance period decision considering the impact of human factors[J]. Power System Technology,2015,39(9):2546-2552.

[8] 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.

[9] 蒲天骄,乔骥,韩笑,等. 人工智能技术在电力设备运维检修中的研究及应用[J]. 高电压技术,2020,46(2):369-383.
PU Tianjiao,QIAO Ji,HAN Xiao,et al. Research and application of artificial intelligence in operation and maintenance for power equipment[J]. High Voltage Engineering,2020,46(2):369-383.

[10] 徐波,韩学山,孙宏斌,等. 状态部分可观测条件下电力设备状态检修决策模型[J]. 中国电机工程学报,2018,38(14):4107-4116,4316.
XU Bo,HAN Xueshan,SUN Hongbin,et al. Condition-based maintenance optimization model for partially observable power equipment[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(14):4107-4116,4316.

[11] 冯玎,林圣,张奥,等. 基于连续时间马尔可夫退化过程的牵引供电设备可靠性预测方法研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(7):1937-1946.
FENG Ding,LIN Sheng,ZHANG Ao,et al. Research on reliability prediction method for traction power supply equipment based on continuous time Markov degradation process[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(7):1937-1946.

[12] 郭丽娟,陶松梅,张炜. 兼顾供电可靠性和LCC的变电站主设备检修策略优化方法[J]. 电力系统自动化,2016,40(15):99-105.
GUO Lijuan,TAO Songmei,ZHANG Wei. Maintenance strategy optimization for main equipment in substations considering both power supply reliability and life cycle cost[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(15):99-105.

[13] 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.

[14] 赵渊,杨晓嵩,谢开贵. UPFC对电网可靠性的灵敏度分析及优化配置[J]. 电力系统自动化,2012,36(1):55-60.
ZHAO Yuan,YANG Xiaosong,XIE Kaigui. Parameter sensitivity and optimal allocation of UPFCs in bulk power systems reliability assessment[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(1):55-60.

[15] AMINIFAR F,FOTUHI-FIRUZABAD M,BILLINTON R. Extended reliability model of a unified power flow controller[J]. IET Generation,Transmission & Distribution,2007,1(6):896-903.

[16] 李生虎,马燕如,董王朝. UPFC扩展状态空间模型和基于矩阵描述的可靠性灵敏度解析算法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(增刊1):44-51.
LI Shenghu,MA Yanru,DONG Wangchao. Extended state space modeling and analytical reliability sensitivity algorithm based on matrix description for UPFC[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(Supplement 1):44-51.

[17] 朱晓荣,刘亚维. 基于元件-系统分级优化的光伏电站维护策略[J]. 电力系统自动化,2020,44(8):92-99.
ZHU Xiaorong,LIU Yawei. Maintenance strategy of photovoltaic power station based on component-system classification optimization[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(8):92-99.

[18] IEEE SA Standards Board. IEEE guide for technology of unified power flow controller using modular multilevel converter:IEEE Std 2745.1[S]. New York,USA:IEEE,2019.

[19] 李辉,邓吉利,姚然,等. 计及运行工况的MMC换流阀可靠性建模与分析[J]. 电力自动化设备,2018,38(10):108-114.
LI Hui,DENG Jili,YAO Ran,et al. Reliability modeling and analysis of MMC converter valve considering operation conditions[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(10):108-114.

[20] LI S,MA Y,HUA Y,et al. Reliability equivalence and sensitivity analysis to UHVDC systems based on the matrix description of the F&D method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2016,31(2):456-464.

作者简介:

李生虎

李生虎(1974—),男,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统规划与可靠性、风电并网电力系统分析与控制、高压直流和柔性输电(**E-mail**:shenghuli@hfut.edu.cn);

胡 涛(1997—),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统规划与可靠性、风电并网系统分析和柔性交流输电技术(**E-mail**:ht970310@mail.hfut.edu.cn);

常雅玲(1998—),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统规划与可靠性、风电并网系统分析(**E-mail**:cyl0902@mail.hfut.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

(下转第103页 continued on page 103)

Optimal control strategy of voltage dependent current order limiter based on constant equivalent DC input resistance

LIU Bo[1],CHEN Zhong[1],YANG Kai[1],LU Chen[1],YAN Jun[1],ZHUANG Weijin[2]
(1. School of Electrical Engineering,Southeast University,Nanjing 210096,China;
2. China Electric Power Research Institute,Nanjing 210003,China)

Abstract: VDCOL(Voltage Dependent Current Order Limiter) is an important control link to suppress the subsequent commutation failure of LCC-HVDC(Line-Commutated-Converter based High Voltage Direct Current) system. By analyzing the converter commutation process of LCC-HVDC system,an evaluation index of VDCOL optimal schemes based on equivalent DC input resistance and an optimal control strategy of VDCOL based on constant equivalent DC input resistance are proposed. Based on the CIGRE HVDC standard test model,different types of VDCOL optimal schemes during fault period is simulated and tested to verify the rationality of the proposed evaluation index and the effectiveness of the proposed control strategy. The simulative results show that the equivalent DC input resistance is positively correlated with the turn-off angle during fault period. After adopting the proposed control strategy,the equivalent DC input resistance can be restored as soon as possible and keep at around 1.0 p.u.. At the same time,the proposed control strategy can effectively suppress the subsequent commutation failure of LCC-HVDC system.

Key words: HVDC power transmission system;commutation failure;evaluation index;VDCOL;optimization

(上接第 96 页 continued from page 96)

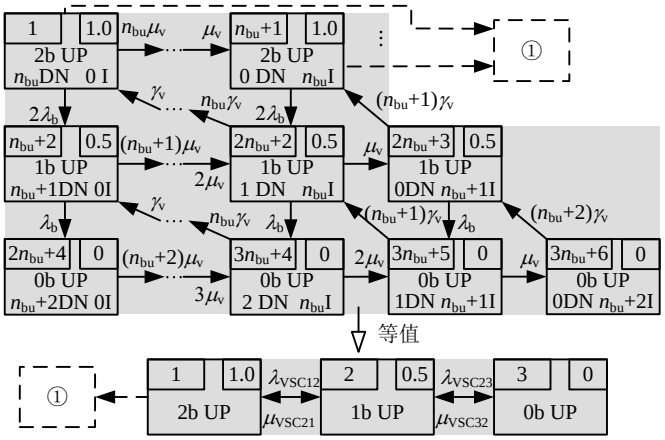
Reliability evaluation to UPFC with abnormal state and routine test

LI Shenghu[1,2],HU Tao[1,2],CHANG Yaling[1,2]
(1. School of Electrical Engineering and Automation,Hefei University of Technology,Hefei 230009,China;
2. Anhui Province Key Laboratory of Renewable Power Utilization and Energy Saving,Hefei 230009,China)

Abstract: The availability of UPFC(Unified Power Flow Controller) depends on the reliability of its components and their routine test strategies. According to the sudden failure ratio of the component,a calculative method of the transition rate of the component with abnormal state is proposed,and the state-space model of UPFC with abnormal state and routine test is built. A sensitivity model of UPFC reliability to failure ratio of the component is built to confirm the vulnerable component,moreover the influence of the routine test parameters on the UPFC's reliability is quantified. According to the analytical results of sensitivity model, the vulnerable component of UPFC is confirmed,the reliability of UPFC with abnormal state and the routine test is quantified,and the influences of the ratio of sudden failure and the ratio from the abnormal state to failure state on the UPFC's reliability are analyzed. The accuracy of the sensitivity analysis method of UPFC reliability with routine test is verified by comparing with the perturbation method.

Key words: UPFC;reliability;abnormal state;routine test;sensitivity analysis

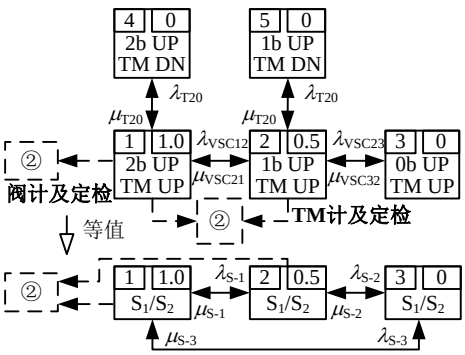
附录 A



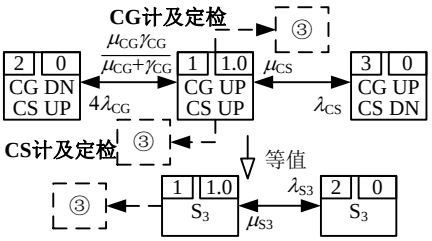
注：状态框左上角为状态序号；右上角为运行容量，其数值表示全额(1.0)、降额(0.5)、停运(0)三状态；UP 表示正常运行；DN 表示故障；I 表示待安装；λ、μ、γ 分别为故障率、修复率、安装率；①表示换流器计及定检后待拓展的状态模型。

图 A1　计及备用换流阀的换流器状态空间

Fig.A1　State space of converter with spare converter valve



(a) $S_{1/2}$ 状态空间

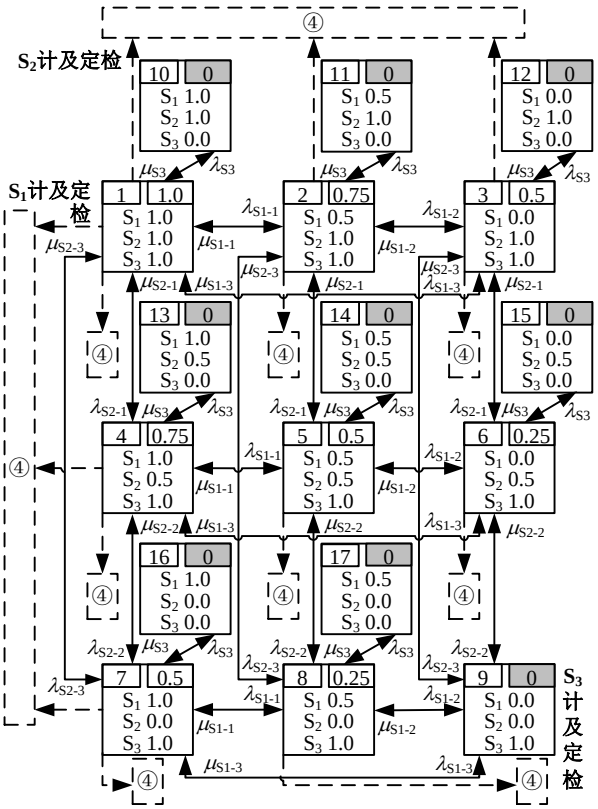


(b) S_3 状态空间

注：②、③分别表示子系统 $S_{1/2}$、S_3 计及定检后待拓展的状态模型。

图 A2　UPFC 子系统状态空间

Fig.A2　State space of subsystems of UPFC



注：④表示 UPFC 计及定检后待拓展的状态模型。

图 A3　UPFC 状态空间

Fig.A3　State space of UPFC

表 A1　等值前、后 UPFC 的运行容量

Table A1　Operation capacity of UPFC before and after equivalence

等值前状态序号	等值后状态序号	ξ_{UC}	ξ_{SM}	ξ_{SC}	ξ_{EQ}
1	1	1.0	1.0	1.0	1.0
2	2	0.5	0.5	1.0	0.75
3	3	0	0	1.0	0.5
4	4	0.5	1.0	0.5	0.75
5	5	0.5	0.5	0.5	0.5
6	6	0	0	0.5	0.25
7	7	0	1.0	0	0.5
8	8	0	0.5	0	0.25
9—17	9	0	0	0	0

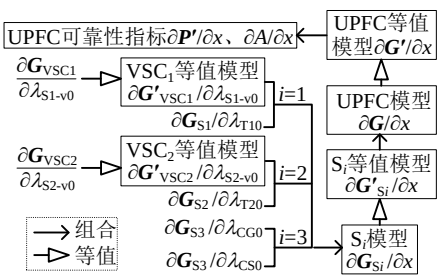
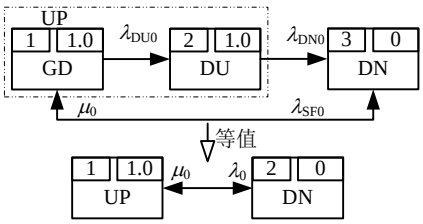
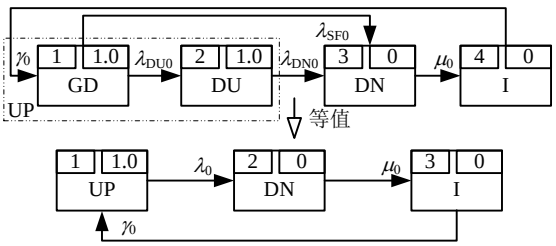


图 A4　确定 UPFC 薄弱元件的灵敏度算法流程

Fig.A4　Flowchart of sensitivity algorithm for confirming vulnerable component of UPFC



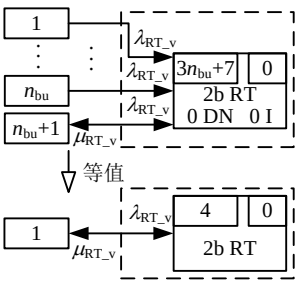
(a) 不计元件安装过程



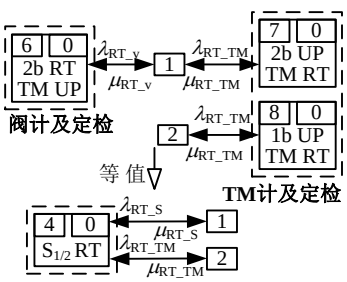
(b) 计及元件安装过程

图 A5　未计及元件安装过程与计及其安装过程时
考虑异常状态的元件可靠性状态空间模型

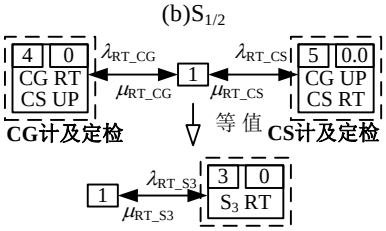
Fig.A5 State space model of component reliability considering abnormal state with and without installation process



(a)换流器



(b)$S_{1/2}$



(c) S_3

注：虚框中为计及定检新增的状态；框外序号为未计及定检的原有状态。

图 A6　计及定检的 UPFC 子系统拓展状态空间模型

Fig.A6　Extended state space models of UPFC subsystems with routine test

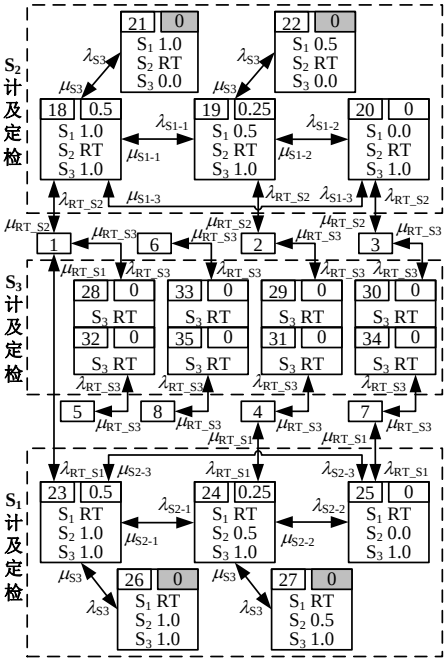


图 A7　计及定检后 UPFC 拓展状态空间模型

Fig. A7　Extended state space model of UPFC with routine test

表 A2　UPFC 元件参数

Table A2　Component parameters of UPFC

单位：次/a

元件	λ_0	μ	γ
$S_{1/v}$-v	0.14	8 760/6	8 760/2
S_2-v	0.14	8 760/6	8 760/2
TM_1	0.10	8 760/30	
TM_2	0.10	8 760/30	
CG	0.10	8 760/15	8 760/3
CS	0.09	8 760/7	-

表 A3　UPFC 状态概率指标

Table A3　State probability indices of UPFC

状态	状态概率	状态	状态概率
1	0.968 4	6	6.040×10^{-6}
2	0.014 86	7	3.937×10^{-4}
3	3.937×10^{-4}	8	6.040×10^{-6}
4	0.014 86	9	8.932×10^{-4}
5	2.279×10^{-4}		

表 A4　UPFC 可用率指标

Table A4　Availability indices of UPFC

可用率	数值	可用率	数值
A_{UC0}	0.983 3	A_{SM0}	0.991 2
A_{SC0}	0.991 2	A_0	0.991 2

表 A5　未考虑、考虑异常状态时阀元件状态概率

Table A5　State probabilities of valve considering abnormal state

情况	P_{GD0}	P_{DU0}	P_{UP0}	P_{DN0}	P_{W0}
未考虑异常状态			0.999 9	9.588×10^{-5}	3.196×10^{-5}
考虑异常状态	0.909 0	0.090 9	0.999 9	9.588×10^{-5}	3.196×10^{-5}

表 A6　计及定检、可用率最大时 UPFC 状态概率指标

Table A6　State probability indices of UPFC with routine test and maximum availability

状态	状态概率	状态	状态概率
1	0.981 00	7	3.374×10^{-4}
2	0.015 05	8	5.177×10^{-6}
3	3.989×10^{-4}	9	8.932×10^{-4}
4	1.831×10^{-3}	10	4.426×10^{-4}
5	2.809×10^{-5}	11	6.791×10^{-6}
6	7.444×10^{-7}	12	1.800×10^{-7}

表 A7　计及定检 UPFC 最大可用率指标

Table A7　Maximum availability indices of UPFC with routine test

可用率	数值	可用率	数值
A_{UC}	0.989 5	A_{SM}	0.991 2
A_{SC}	0.997 4	A	0.994 3

表 A8　计及定检 UPFC 最大可用率指标对各元件故障率的灵敏度

Table A8　Sensitivity of maximum availability indices to failure rate of each component of UPFC with routine test

元件	对元件故障率的灵敏度			
	UC 功能	SM 功能	SC 功能	UPFC 设备
S_1-v	-5.375×10^{-2}	-5.390×10^{-2}	5.800×10^{-10}	-2.695×10^{-2}
T_1	-3.387×10^{-3}	-3.393×10^{-3}	2.417×10^{-9}	-1.697×10^{-3}
S_2-v	-9.689×10^{-3}	3.365×10^{-12}	-9.842×10^{-3}	-4.921×10^{-3}
T_2	-3.386×10^{-3}	1.211×10^{-9}	-3.413×10^{-3}	-1.706×10^{-3}
CG	-8.125×10^{-3}	-8.139×10^{-3}	-8.190×10^{-3}	-8.165×10^{-3}
CS	-7.900×10^{-4}	-7.913×10^{-4}	-7.963×10^{-4}	-7.938×10^{-4}

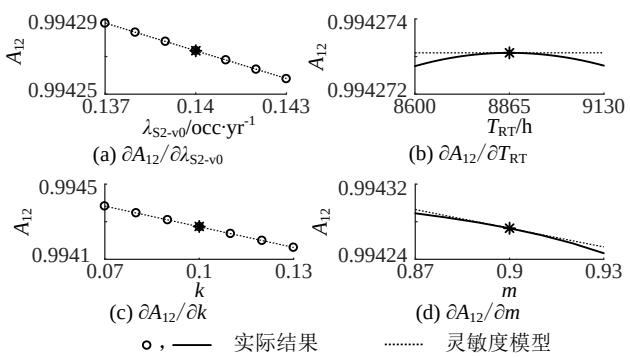


图 A8　计及定检灵敏度模型检验

Fig.A8　Verification of sensitivity model with routine test