

## 含 TCSC 的电网运行风险评估模型

赵 渊<sup>1</sup>, 邱玉良<sup>1</sup>, 宿晓岚<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆市电力公司市区供电分公司, 重庆 400013)

**摘要:** 通过对 TCSC 结构和故障模式分析, 构建了 TCSC 及其子模块的可靠性框图, 计及部件冗余配置讨论了子模块可靠性; 深入分析了 TCSC 的电抗随电流而变化的运行特性, 基于此提出了一种计及 TCSC 视在电抗约束的线路可靠性模型; 根据实时运行条件下故障率参数的时变特性, 应用马尔可夫理论推导了 TCSC 核心部件以及整个线路的状态概率计算公式, 并基于运行风险理论建立了条件相关的故障率模型, 该模型定量考虑了负荷随机波动、元件老化以及气温变化对元件可靠性的影响。通过对 RBTS 测试系统可靠性的计算分析, 验证了所提模型的有效性和正确性。

**关键词:** TCSC; 可靠性框图; 运行风险; 实时运行条件; 模型

**中图分类号:** TM 734

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.07.009

## 0 引言

柔性交流输电系统 FACTS(Flexible AC Transmission System)通过输电网络参数调节实现潮流和电压控制, 从而有效降低网损和发电成本, 提高交流输电系统的稳定性和运行可靠性<sup>[1-3]</sup>。TCSC 属于晶闸管控制的串联型 FACTS 元件, 可调节输电线路电抗来提高线路传输功率极限, 故对系统可靠性有重要改善作用。国内外学者在 TCSC 对电力系统可靠性的影响上进行过初步探索研究。文献[4-5]考虑了 2 种不同故障模式, 建立了多模块 TCSC 的状态空间转移模型; 文献[6]在文献[4-5]基础上建立了含 TCSC 线路的简化可靠性模型; 文献[7]在 TCSC 的线路可靠性模型中考虑了开关故障; 文献[8]在含 TCSC 的柔性输电系统可靠性研究中, 计入了参数的不确定性; 文献[9]从暂态稳定性的角度研究了 TCSC 降低系统暂态失稳风险的有效性。迄今为止, 在 TCSC 对电网可靠性的影响方面, 研究内容主要集中在规划可靠性评估, 而针对短期运行可靠性的研究甚少。

在短期运行可靠性评估中, 需要计及设备运行条件和外界环境对其可靠性的影响, 即电力设备的可靠性参数会随运行条件和环境而实时变化。文献

[10-12]分别提出了元件故障率按指数函数变化的条件相关故障率 CDFR(Condition-Dependent Failure Rate)模型、线性函数和双曲正切函数的线路停运概率模型。这些模型的共同点是将元件可靠性参数和元件运行条件(如潮流、电压等)通过一定解析函数拟合而成, 此方法侧重于分析实时运行条件对元件可靠性参数的影响。然而, TCSC 可以通过改变电网参数改变运行条件, 因此它不仅对系统中其他电力元件的可靠性产生影响, 也对自身的可靠性有一定影响。而现有的电网运行风险评估模型主要针对常规电力设备, 很少涉及 TCSC 元件。

本文首先根据 TCSC 结构和故障模式建立了计及部件冗余配置的 TCSC 可靠性框图; 然后, 针对 TCSC 的电抗-电流( $X-I$ )运行特征, 提出一种计及 TCSC 视在电抗约束的含 TCSC 的线路可靠性模型; 最后, 根据实时运行条件下故障率参数的时变特性, 应用马尔可夫理论推导了 TCSC 核心部件和整个线路的状态概率计算公式, 建立了条件相关的故障率模型。

## 1 TCSC 的可靠性建模

## 1.1 TCSC 的结构和故障模式

TCSC 一次主回路由多个 TCSC 子模块串联组成, 子模块中主要元件有: 电容器组、晶闸管阀及其冷却系统、旁路电抗器  $L$ 、金属氧化物限压器(MOV)以及旁路开关, 其结构如图 1 所示。

TCSC 故障模式分为子模块故障和整台 TCSC 故障 2 种。当子模块中电容器组或者晶闸管阀故障导致该子模块失效时, 子模块保护(MCP)动作并控制子模块的旁路断路器合闸, 实现故障子模块的隔离, 故此种故障模式不会影响其他子模块正常工作; 当

收稿日期: 2013-10-08; 修回日期: 2014-05-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50977094); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CDJZR11150012); 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目(2007DA10512711208); 重庆市自然科学基金资助项目(CSTC, 2011BB6047)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50977094), the Fundamental Research Funds for the Central Universities(CDJZR11150012), Scientific Research Foundation of State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security(2007DA10512711208) and the Natural Science Foundation of Chongqing(CSTC, 2011BB6047)

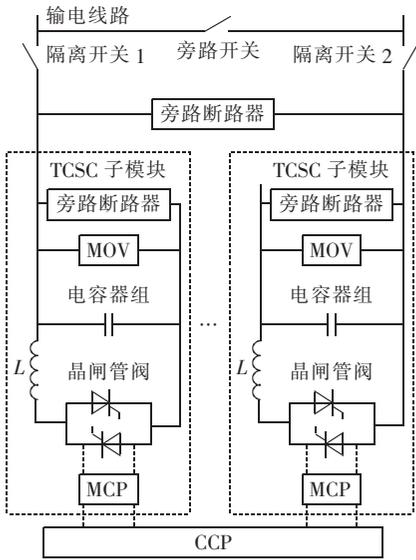


图 1 TCSC 结构  
Fig.1 Structure of TCSC

MOV 故障时,为防止保护间隙燃弧时间过长,需由 TCSC 公共保护 (CCP) 控制 TCSC 的旁路断路器合闸,使整个 TCSC 退出运行。

为了提高 TCSC 的可靠性,一次主回路设备采用冗余配置。在设计时,电容器组和晶闸管阀的内部元件留有一定冗余数,当其失效数在冗余数范围内时,该部件不会失效。故分析 TCSC 可靠性模型时应考虑到 TCSC 部件的冗余配置。

1.2 TCSC 的可靠性模型

由 TCSC 的子模块故障模式可知,只要其中一个 TCSC 子模块正常运行,TCSC 不会失效,只有当 TCSC 全部子模块故障时 TCSC 才会失效;当 MCP、MOV 或晶闸管阀的冷却系统故障时,CCP 动作并将 TCSC 隔离;但当 CCP 失效时 TCSC 故障后将无法被隔离,故 CCP 故障会影响 TCSC 所在线路的正常运行。假设 TCSC 的开关设备完全可靠,则 TCSC 可靠性框图如图 2 所示。由于 TCSC 每个子模块配置相同且相互独立,对于含  $G$  个子模块的 TCSC, $k$  个子模块正常运行的概率为:

$$P_{Tr,k} = C_G^k (P_T)^k (Q_T)^{G-k} \quad (1)$$

其中,  $C_G^k$  为  $G$  个子模块中有  $k$  个子模块正常运行的排列组合数;  $P_T$ 、 $Q_T$  分别为 TCSC 子模块正常运行和故障失效的概率。子模块完全正常或部分正常运行的概率如式(2)所示。

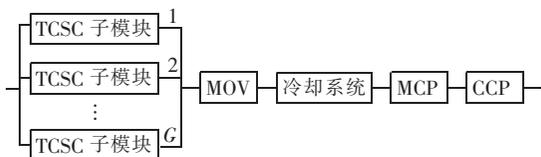


图 2 TCSC 可靠性框图  
Fig.2 Reliability block diagram of TCSC

$$P_{Tr} = 1 - (Q_T)^G \quad (2)$$

由 TCSC 可靠性框图可得 TCSC 处于运行状态以及完全失效的概率分别为:

$$P_{TCSC} = P_{Tr} P_{MOV} P_{cool} P_{MCP} P_{CCP} \quad (3)$$

$$Q_{TCSC} = 1 - P_{Tr} P_{MOV} P_{cool} P_{MCP} P_{CCP} \quad (4)$$

其中,  $P_{Tr}$ 、 $P_{MOV}$ 、 $P_{cool}$ 、 $P_{MCP}$ 、 $P_{CCP}$  分别为子模块系统、MOV、冷却系统、MCP、CCP 正常运行的概率。

1.3 TCSC 子模块可靠性模型

TCSC 的可靠性模型已考虑导致整台 TCSC 失效的情况,因此 TCSC 子模块的可靠性模型主要针对子模块中的元件引起模块本身失效的情况,故 TCSC 子模块可靠性框图如图 3 所示。



图 3 TCSC 子模块可靠性框图  
Fig.3 Reliability block diagram of TCSC submodule

电容器组由多个电容器单元串并联组成,一个电容器单元由多个电容元件串并联组成。对于内熔丝保护方式的电容器,每个电容元件都串有熔丝对其进行保护,当其中一个电容元件被击穿,故障电容元件被隔离,其他电容元件正常运行。此时,电容器只损失一个元件,不会影响该电容器单元的正常运行,只有当损坏元件较多时,电容器单元才会由于雪崩效应而退出运行<sup>[13]</sup>。因此,电容器单元相当于配置了一定冗余数的电容元件。TCSC 采用内熔丝电容器时,电容器组采用 H 桥型接线,如图 4 所示,电容器组分成参数相同的 4 个桥臂,每个臂的电容器单元先并后串,串、并联数分别为  $N/2$  和  $M/2$ ;电容器单元中的电容元件先并后串,串、并联数分别为  $n$  和  $m$ 。

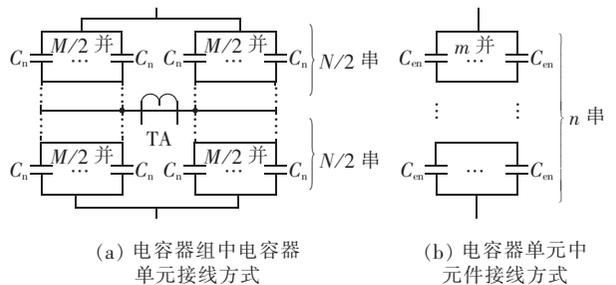


图 4 电容器组和电容器单元内部接线

Fig.4 Internal wiring of capacitor bank and capacitor unit

当电容器单元中一个串联段有电容元件损坏后,与之并联的正常电容元件电流将会增加,产生过电压。由于少量元件的损坏对电容器组电容量的影响较小,为简化分析,假设故障前后整个电容器组承受的电压保持不变,则电容器单元中故障段完好元件的过电压倍数<sup>[14]</sup>为:

$$K_{ev}(x) = \frac{MNmn}{MNmn - x(MNn - MN + 2N - 4)} \quad (5)$$

其中,  $x$  为电容器单元中一个串联段的损坏电容元件数。电容元件的冗余数则为  $K_{ev}$  等于最大允许过电压倍数时所对应的损坏元件数。

$$d = \frac{MNmn(k_{ev_{\max}} - 1)}{k_{ev_{\max}}(MNn - MN + 2N - 4)} \quad (6)$$

其中,  $k_{ev_{\max}}$  为电容元件最大允许过电压倍数。

令  $d_e = [d]$ ,  $d_e$  为一个串联段中冗余电容元件数,  $[ ]$  表示向下取整。在对有内熔丝的电容器组进行不平衡保护整定时, 要求保障故障电容器单元中故障串联段的剩余完好元件上的连续运行电压不超过元件额定电压的 1.3 倍, 即  $k_{ev_{\max}}$  不超过 1.3, 由此可以推算出电容器组不平衡保护动作整定值, 即不平衡保护在  $d_e + 1$  个电容元件发生击穿时动作跳闸<sup>[15-17]</sup>。故电容器单元的可靠性框图如图 5 所示。

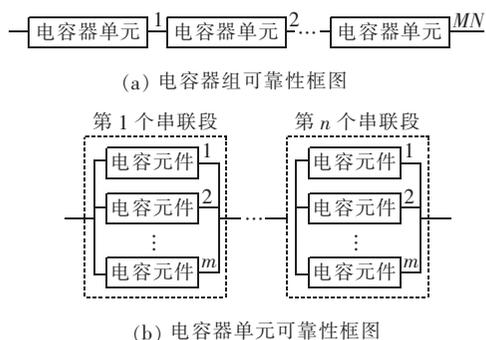


图 5 电容器组和电容器单元可靠性框图

Fig.5 Reliability block diagram of capacitor bank and capacitor unit

当电容器单元有电容元件损坏时, 损坏电容元件所在故障段的电压升高, 导致故障段剩余电容元件击穿故障概率增加, 这些电容元件发生故障的可能性远远大于其他完好串联段的电容元件, 因此故障单元因雪崩现象而故障的可能性也远大于其他完好单元, 为简化分析, 可作如下近似假设:

- 忽略电容器单元中各串联段同时故障的可能性, 即各串联段故障为互斥事件;
- 忽略单相电容器组中各单元同时故障的可能性, 即各电容器单元故障为互斥事件;
- 三相电容器组相互独立, 各相电容器组故障为独立事件。

则电容器单元的故障概率可用下式表示:

$$Q_{Cn} = nQ_{Cr}P_{Ce(n-1)} \quad (7)$$

$$Q_{Cr} = 1 - \sum_{i=m-d_e}^m C_m^i (P_{Ci})^i (Q_{Ci})^{m-i} \quad (8)$$

$$P_{Ce(n-1)} = [(P_{Cn})^m]^{n-1} \quad (9)$$

其中,  $Q_{Cr}$  为电容器单元中一个串联段故障失效的概率;  $P_{Ce(n-1)}$  为其他  $n-1$  个串联段完全正常的概率;  $C_m^i$  为一个串联段的  $m$  个电容元件中有  $i$  个电容元件正常运行的排列组合数;  $P_{Ci}$ 、 $Q_{Ci}$  分别为当电容器单元故障段剩余  $i$  个电容元件时, 这些电容元件正

常运行和故障失效的概率;  $P_{Cn}$  为完好串联段的电容元件正常运行的概率。

单相电容器组的故障概率可用式(10)表示:

$$Q_{CB,1} = MNQ_{Cn}P_{Cn(MN-1)} \quad (10)$$

$$P_{Cn(MN-1)} = \{[(P_{Cn})^m]^n\}^{MN-1} \quad (11)$$

其中,  $P_{Cn(MN-1)}$  为其他  $MN-1$  个完好单元完全正常的概率。

三相电容器组的故障概率为:

$$Q_{CB} = 3Q_{CB,1} = 3MNQ_{Cn}P_{Cn(MN-1)} \quad (12)$$

晶闸管阀由双向反并联的晶闸管对、晶闸管电子设备(TE)、阻尼电阻  $R_s$ 、阻尼电容  $C_s$  和直流均压电阻  $R_{DC}$  构成, 其结构如图 6 所示<sup>[13]</sup>。

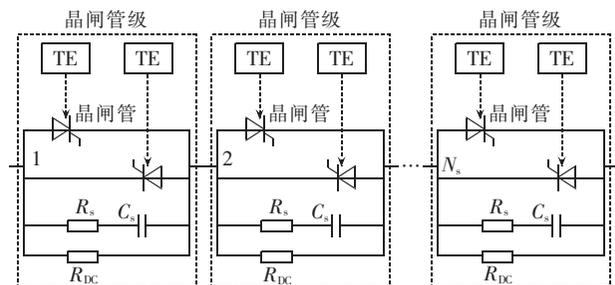


图 6 晶闸管阀结构

Fig.6 Structure of thyristor valve

晶闸管、晶闸管电子设备、阻尼电阻和阻尼电容故障将导致其所在的晶闸管级不能正常运行; 直流均压电阻主要使晶闸管在关断情况下承担的直流电压在晶闸管阀层进行均匀分布, 其阻值很大, 正常运行时不起作用。因此可得到晶闸管阀的可靠性框图, 如图 7 所示。

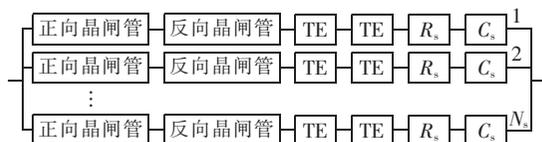


图 7 晶闸管阀可靠性框图

Fig.7 Reliability block diagram of thyristor valve

晶闸管阀留有一定裕度, 当晶闸管阀内有晶闸管级损坏时, 其他完好晶闸管级的电压升高, 导致其故障概率增加。对于晶闸管级串联数为  $N_s$ 、晶闸管级冗余数为  $d_s$  的晶闸管阀, 其故障失效概率为:

$$Q_{SCR} = 3Q_{Sr} = 3 \left[ 1 - \sum_{i=N_s-d_s}^{N_s} C_{N_s}^i (P_{Si})^i (Q_{Si})^{N_s-i} \right] \quad (13)$$

$$P_{Si} = P_{THVi}^2 P_{TEi}^2 P_{Rsi} P_{Csi} \quad (14)$$

$$Q_{Si} = 1 - P_{THVi}^2 P_{TEi}^2 P_{Rsi} P_{Csi} \quad (15)$$

其中,  $C_{N_s}^i$  为  $N_s$  个晶闸管级中有  $i$  个晶闸管级正常运行的排列组合数;  $Q_{Sr}$  为单相晶闸管阀故障失效的概率;  $P_{Si}$ 、 $Q_{Si}$  分别为当晶闸管阀剩余  $i$  个晶闸管级时, 这些晶闸管级正常运行和故障失效的概率;  $P_{THVi}$ 、 $P_{TEi}$ 、 $P_{Rsi}$ 、 $P_{Csi}$  为晶闸管阀剩余  $i$  个晶闸管级时, 晶闸管级中晶闸管、晶闸管电子设备、阻尼电阻和阻尼电容

正常运行的概率。

考虑电抗器的影响,TCSC 子模块正常运行和故障失效的概率分别为:

$$P_T = (1 - Q_{CB})(1 - Q_{SCR})P_{TL} \quad (16)$$

$$Q_T = 1 - (1 - Q_{CB})(1 - Q_{SCR})P_{TL} \quad (17)$$

其中,  $P_{TL}$  为电抗器正常运行的概率。

## 2 含 TCSC 线路的可靠性模型

### 2.1 TCSC 的视在电抗约束

TCSC 补偿范围由触发角、电压和电流约束等共同决定,如图 8 所示<sup>[18]</sup>,图中视在电抗为以  $X_C$  为基准值的标么值,线路电流为以线路额定电流  $I_{LN}$  为基准值的标么值。

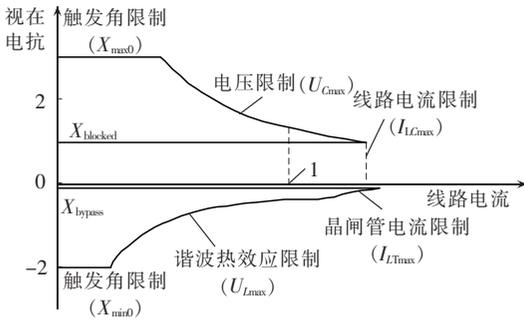


图 8 单模块 TCSC  $X-I$  特性曲线

Fig.8  $X-I$  characteristic curve of TCSC with single module

在容性区域内,TCSC 视在电抗的最大值为:

$$X_{max} = \min[X_{max0}, X_{maxUC}] \quad (18)$$

$$X_{maxUC} = U_{Cmax} / I_L \quad (19)$$

其中,  $X_{max0}$ 、 $X_{maxUC}$  分别为触发角限制和电压限制决定的 TCSC 视在电抗最大值;  $I_L$  为线路电流;  $U_{Cmax}$  为 TCSC 在容性区域持续运行的最大允许电压。在本节中,所有电抗以  $X_C$  (标称容抗)为基准值;所有电流以线路额定电流  $I_{LN}$  为基准值;所有电压以  $I_{LN} X_C$  为基准值。

在感性区域内,TCSC 视在电抗最小值为:

$$X_{min} = \max[X_{min0}, X_{minUL}, X_{minLT}] \quad (20)$$

$$X_{minUL} = U_{Lmax} / I_L \quad (21)$$

$$X_{minLT} = 1 - I_{LTmax}(1 - X_{bypass}) / I_L \quad (22)$$

其中,  $X_{min0}$ 、 $X_{minUL}$ 、 $X_{minLT}$  分别为触发角限制、谐波热效应限制和晶闸管电流限制决定的 TCSC 视在电抗最小值;  $U_{Lmax}$  为 TCSC 在感性区域持续运行的最大允许电压;  $I_{LTmax}$  为 TCSC 在感性区域晶闸管全导通运行的最大允许线路电流;  $X_{bypass}$  为 TCSC 在旁路模式下的视在电抗。

由上述可得单模块 TCSC 的运行范围:

$$X_{TCSC} \in \begin{cases} [X_{max}, X_{blocked}] \cup [X_{bypass}, X_{min}] & I_L \leq I_{LGmax} \\ [X_{bypass}, X_{min}] & I_L > I_{LGmax} \end{cases} \quad (23)$$

其中,  $X_{TCSC}$  为 TCSC 的视在电抗;  $I_{LGmax}$  为 TCSC 在容

性区域持续运行的最大允许线路电流;  $X_{blocked}$  为 TCSC 在闭锁模式下的视在电抗。

但对于多模块 TCSC,不同数量的子模块运行时,TCSC 对应不同的  $X-I$  特性曲线,如图 9 所示<sup>[7]</sup>。单模运行时其补偿范围会出现断层,视在电抗变化范围为  $[X_{max}, X_{blocked}] \cup [X_{bypass}, X_{min}]$ ;当多个子模块运行时,TCSC 能实现视在电抗的连续控制,且随着运行子模块数的增加,连续补偿范围增加,而 TCSC 视在电抗最大值和最小值均不变化。考虑稳态运行时线路电流不会很大,可认为 2 个及以上的子模块运行时 TCSC 的视在电抗范围为  $[X_{max}, X_{min}]$ 。

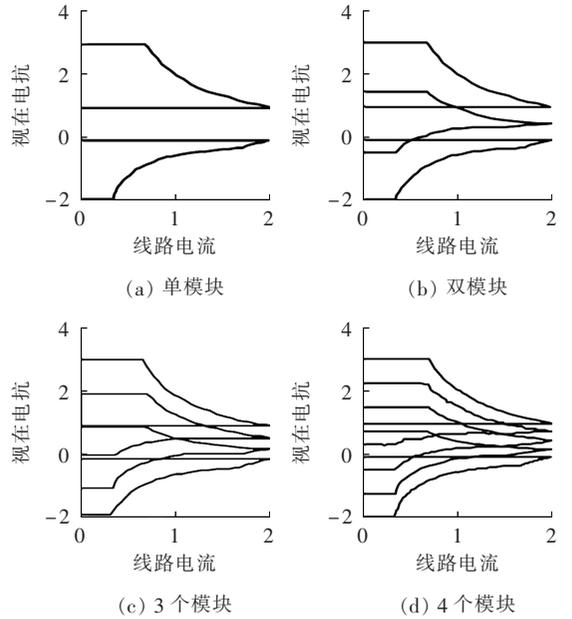


图 9 不同数量的模块运行时对应的 TCSC  $X-I$  特性曲线

Fig.9  $X-I$  characteristic curves of TCSC with different operating module quantities

### 2.2 计及 TCSC 视在电抗约束的线路可靠性模型

由于 TCSC 视在电抗的变化范围随运行子模块数和运行条件变化,故在最优负荷削减模型中需分别对不同视在电抗约束予以计及。设  $P_L$  和  $Q_L$  表示线路正常运行和故障失效概率,对模块 4 的 TCSC,当 2 个及以上的子模块运行时,认为 TCSC 补偿范围连续,此时线路正常运行的概率为:

$$P_{L\_IT} = P_L P_{MOV} P_{cool} P_{MCP} P_{CCP} \sum_{i=2}^4 P_{Tr,i} \quad (24)$$

当单个子模块运行时,TCSC 补偿范围断层,此时线路正常运行的概率为:

$$P_{L\_IT} = P_L P_{MOV} P_{cool} P_{MCP} P_{CCP} P_{Tr,1} \quad (25)$$

当 TCSC 旁路时,线路无 TCSC 补偿,此时其正常运行的概率为:

$$P_{L\_OT} = P_L P_{CCP} (1 - P_{MOV} P_{cool} P_{MCP} P_{Tr,i}) \quad (26)$$

线路故障以及 CCP 故障都会导致线路失效,故含 TCSC 线路失效的概率为:

$$Q_{LT} = Q_L + P_L(1 - P_{CCP}) \quad (27)$$

可见,要得到含 TCSC 线路的可靠性模型,关键在于求出 TCSC 部件和线路的状态概率。在 TCSC 中,电容器组和晶闸管阀的可靠性与运行条件紧密相关,由式(7)~(15)可知,要得到电容器组和晶闸管阀的故障概率,关键是求出  $P_{C_i}$ 、 $Q_{C_i}$ 、 $P_{THV_i}$ 、 $P_{TEV}$ 、 $P_{R_{Si}}$  和  $P_{C_{Si}}$ 。由于  $P_{TEV}$ 、 $P_{R_{Si}}$  和  $P_{C_{Si}}$  很小,而晶闸管是晶闸管阀的关键部件,在很大程度上决定晶闸管阀的可靠性,因此本文主要对其和电容元件进行分析。

### 3 基于实时运行条件的元件瞬时状态概率和故障率

#### 3.1 晶闸管、电容元件和线路的瞬时状态概率

在传统可靠性评估中,元件故障率由统计平均值得到;而在运行风险评估中,因评估周期很短,元件故障率随运行条件实时变化。假设晶闸管、电容元件和线路有运行和失效 2 个状态,由马尔可夫过程可得它们的瞬时状态概率,如式(28)、(29)所示。

$$P(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{e^{-(\lambda + \mu)t}}{\lambda + \mu} [\lambda P(0) - \mu Q(0)] \quad (28)$$

$$Q(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} + \frac{e^{-(\lambda + \mu)t}}{\lambda + \mu} [\mu Q(0) - \lambda P(0)] \quad (29)$$

其中,  $P(t)$ 、 $Q(t)$  分别为  $t$  时刻元件正常运行和故障失效概率;  $P(0)$ 、 $Q(0)$  分别为评估周期初始时刻元件正常运行和故障失效概率;  $\lambda$  和  $\mu$  分别为元件故障率和修复率,由于运行风险评估周期很短,可将元件看作不可修复元件,即  $\mu = 0$ 。

现有文献采用瞬时状态概率模型时一般近似认为元件故障率在评估期间大小不变,然而实际运行中负荷水平和外界环境实时变化导致故障率随时间变化。故本文将评估周期分成  $N$  个时间段  $\Delta t$ , 每个时间段内运行条件近似恒定,且根据每个时间段内的运行条件计算元件故障率,则  $(j+1)\Delta t$  时刻元件的状态概率如式(30)、(31)所示。

$$P((j+1)\Delta t) = e^{-\lambda_{j+1}\Delta t} P(j\Delta t) \quad (30)$$

$$Q((j+1)\Delta t) = 1 - e^{-\lambda_{j+1}\Delta t} P(j\Delta t) \quad (31)$$

其中,  $P((j+1)\Delta t)$ 、 $Q((j+1)\Delta t)$  分别为  $(j+1)\Delta t$  时刻元件正常运行和故障失效概率;  $\lambda_{j+1}$  为  $[j\Delta t, (j+1)\Delta t]$  时间段元件故障率;  $P(j\Delta t)$  为  $j\Delta t$  时刻元件正常运行的概率。那么:

$$P((j+1)\Delta t) = e^{-(\lambda_{j+1} + \lambda_j)\Delta t} P((j-1)\Delta t) \quad (32)$$

$$Q((j+1)\Delta t) = 1 - e^{-(\lambda_{j+1} + \lambda_j)\Delta t} P((j-1)\Delta t) \quad (33)$$

依此类推,可得:

$$P((j+1)\Delta t) = \exp\left[-\sum_{k=1}^{j+1} (\lambda_k \Delta t)\right] P(0) \quad (34)$$

$$Q((j+1)\Delta t) = 1 - \exp\left[-\sum_{k=1}^{j+1} (\lambda_k \Delta t)\right] P(0) \quad (35)$$

可见,只要知道晶闸管、电容元件和线路的  $P(0)$

和  $\lambda_k$ , 就可以求得它们在任意时刻的状态概率。如果能确定这些元件在评估周期初始时刻处于运行状态,则  $P(0) = 1$ 。

#### 3.2 晶闸管、电容元件和线路的故障率

##### 3.2.1 基于载流量和服役时间的元件故障率模型

从绝缘材料的热特性角度出发分析载流量对元件故障率的影响,可得到元件的故障率与载流量的关系<sup>[10]</sup>,如式(36)所示。

$$\lambda(I) = \begin{cases} A e^{BI} & I^{\text{spec}} < I < I^{\text{trip}} \\ \lambda_0 & I \leq I^{\text{spec}} \end{cases} \quad (36)$$

$$A = \frac{\lambda_0}{e^{BI^{\text{spec}}}} \quad (37)$$

$$B = \frac{\ln(\lambda_0 / \lambda_{\text{max}})}{I^{\text{spec}} - I^{\text{trip}}} \quad (38)$$

其中,  $\lambda(I)$  为偶发故障期元件故障率;  $\lambda_0$  为正常运行条件下的故障率,近似为长期统计数据平均值  $\bar{\lambda}$ , 即  $\lambda_0 = \bar{\lambda}$ ;  $I^{\text{spec}}$  为额定载流量;  $I^{\text{trip}}$  为保护装置整定值;  $A$ 、 $B$  为常数。

元件故障率随载流量  $I$  的变化曲线如图 10 所示。

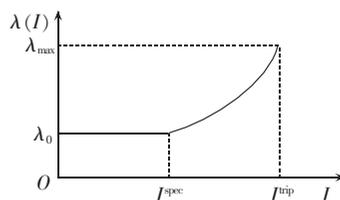


图 10 元件故障率与载流量关系曲线

Fig.10 Relationship curve of component failure rate vs. load flow

当元件服役时间较长进入损耗故障期后,需考虑元件老化因素,元件老化失效故障率可由式(39)计算<sup>[19]</sup>。

$$\Delta\lambda(T) = \beta / T_{63\%} (T / T_{63\%})^{\beta-1} \quad (39)$$

其中,  $T$  为元件服役时间;  $\beta$  为形状参数;  $T_{63\%}$  为故障率为 63% 时对应的元件寿命。需要说明的是,对于具有相同服役时间的元件,其老化程度受运行条件和外界环境的影响会有较大差异,因此需将元件服役时间换算为一定参考条件下的等效服役时间  $T_e$ , 式(39)改为:

$$\Delta\lambda(T_e) = \beta / T_{63\%} (T_e / T_{63\%})^{\beta-1} \quad (40)$$

由于运行风险评估的周期(例如日风险评估)很短,在评估周期内因老化导致的元件寿命损耗增加可以忽略不计,因此老化失效故障率可近似取为常数,可见在短期评估周期内可用指数分布来近似描述老化故障。基于上述分析,计及载流量和等效服役时间的元件故障率可表示为:

$$\lambda(T_e, I) = \begin{cases} \lambda(I) & T_e \leq T_N \\ \lambda(I) + \Delta\lambda(T_e) & T_e > T_N \end{cases} \quad (41)$$

其中,  $T_N$  为元件的有效寿命。

3.2.2 晶闸管、电容元件和线路的条件相关故障率

a. 电容元件:设电容器单元完好串联段中每个电容元件承受电压为  $U_C$ , 对应故障率  $\lambda_{Cm}(T_{Ce}, I_C) = \lambda_{Cm}(T_{Ce}, U_C/X_C)$ ; 当电容器单元故障段剩余  $i$  个完好电容元件时, 这些电容元件承受电压为  $K_{ev}(m-i)U_C$ , 其故障率为  $\lambda_{Ci}(T_{Ce}, K_{ev}(m-i)U_C/X_C)$ , 即  $\lambda_{Ci}(T_{Ce}, K_{ev}(m-i)I_C)$ , 计算公式为式(41)。

b. 晶闸管:设完好晶闸管阀中每个晶闸管级承受电压为  $U_S$ , 其内部晶闸管承受电压为  $U_{THY}$ ,  $U_{THY} = U_S$ , 令该晶闸管阻抗为  $Z_{THY}$ , 对应故障率为  $\lambda_{THYe}(T_{THYe}, I_{THY}) = \lambda_{THYe}(T_{THYe}, U_{THY}/Z_{THY})$ ; 当晶闸管阀剩余  $i$  个完好晶闸管级时, 这些晶闸管级中的晶闸管承受电压为  $K_{Sv}(N_s-i)U_S$ , 其中  $K_{Sv}(N_s-i) = N_s/i$ , 则该晶闸管故障率为  $\lambda_{THYi}(T_{THYe}, K_{Sv}(N_s-i)U_{THY}/Z_{THY})$ , 即为  $\lambda_{THYi}(T_{THYe}, K_{Sv}(N_s-i)I_{THY})$ , 计算公式为式(41)。

c. 线路元件:传统线路额定载流量是基于最恶劣气候条件得到的, 不能正确反映不同气候条件下线路的实际允许载流量。为定量分析评估周期内气温变化对线路可靠性的影响, 可通过天气相关的线路实时静态额定载流量  $I_{LN}$  来代替  $I^{spec}$ ,  $I_{LN}$  由摩尔根公式计算<sup>[20]</sup>, 如式(42)所示。线路故障率可由式(41)计算。

$$I^{spec} = I_{LN} = \sqrt{\frac{9.920(vD)^{0.485} + A - \gamma DS_i}{\zeta R_d}} \quad (42)$$

其中,  $A = \pi \sigma D k_e [(273 + t_c)^4 - (273 + t_0)^4]$ ,  $\sigma$  为斯蒂芬-鲍尔茨曼常数,  $t_c$  为导体稳态温度,  $t_0$  为环境温度;  $v$  为风速;  $D$  为导线外径;  $k_e$  为导线表面的辐射系数;  $\gamma$  为导线表面吸热系数;  $S_i$  为日照强度;  $R_d$  为工作温度下导体的支路电阻;  $\zeta, \tau$  为常数。

4 算例分析

本文以 RBTS 测试系统<sup>[21]</sup>为例对电网运行风险进行评估分析。在评估中, 输电线路的额定容量取为原始数据的 70%,  $I^{spec}$ 、 $I^{trip}$  分别取为额定载流量的 80% 和 120%, 电容元件和晶闸管元件的  $I^{spec}$ 、 $I^{trip}$  分别取为额定载流量的 100% 和 120%, 元件最大故障率取为平均故障率的 20 倍。线路 1 和线路 6 附近负荷较大, 本文选择在这 2 条线路安装 TCSC。TCSC 部件配置参数如表 1 所示<sup>[15, 22]</sup>, TCSC 视在电抗约束参数如表 2 所示<sup>[6, 18]</sup>(表中数据为标么值), TCSC 子模块部件故障率参数取值如表 3 所示。MOV、旁路电抗

表 1 TCSC 部件配置参数

Tab.1 Configuration data of TCSC components

参数	取值	参数	取值
$M$	8	$n$	4
$N$	22	$N_s$	26
$m$	15	$d_s$	2

表 2 TCSC 视在电抗约束参数

Tab.2 Constraint data of TCSC apparent reactance

参数	取值	参数	取值
$X_{max0}$	2.0	$X_{min0}$	-2.0
$U_{Cmax}$	1.15	$U_{Lmax}$	-0.3
$I_{LCmax}$	1.15	$I_{LTmax}$	1.35
$X_{bypass}$	-0.15	$X_{locked}$	0.1

表 3 TCSC 部件故障率参数

Tab.3 Parameters of TCSC component failure rate

元件	故障率/(次·a <sup>-1</sup> )	元件	故障率/(次·a <sup>-1</sup> )
电容	0.040	$R_s$	0.001
晶闸管	0.010	$C_s$	0.002
TE	0.001		

器、冷却系统、MCP 和 CCP 的故障概率取为 0.005。

4.1 含 TCSC 线路可靠性参数计算结果

根据前述的元件运行可靠性模型, 本文分别计算了 24 h 含 TCSC 线路的状态概率, 令电容元件、晶闸管和线路的等效服役时间均为 5 a。

a. 24 h 内负荷水平不随时间变化, 在不同系统负荷系数条件下, 含 TCSC 线路在 23:00—24:00 时段的状态概率如表 4 所示。

b. 24 h 内负荷水平不随时间变化, 系统负荷系数为 1.0, 含 TCSC 线路在不同时段的状态概率如表 5 所示。

c. 24 h 内负荷水平随时间变化, 含 TCSC 线路在不同时段的状态概率如表 6 所示。

由表 4 可知, 线路故障率随着负荷系数的增加而增加, 尤其当负荷系数增至 1.1 时尤为明显, 这是由于 TCSC 子模块的故障增加了线路的故障率。由表 5 可知, 线路故障率随时间增加而呈递增趋势。

表 4 含 TCSC 线路在 23:00—24:00 时段的状态概率

Tab.4 State probability of transmission line with TCSC from 23:00 to 24:00

状态	负荷系数	$P_{Lk,T}$	$P_{Ll,T}$	$P_{L0,T}$	$Q_{L,T}$
1	0.60	0.976 13	$4.86 \times 10^{-7}$	0.014 79	0.009 08
2	0.70	0.976 13	$4.86 \times 10^{-7}$	0.014 79	0.009 08
3	0.80	0.976 13	$4.86 \times 10^{-7}$	0.014 79	0.009 08
4	0.90	0.973 48	$4.84 \times 10^{-7}$	0.014 75	0.011 77
5	1.00	0.960 70	0.000 01	0.014 55	0.024 74
6	1.10	0	0	0.937 58	0.062 42

表 5 含 TCSC 线路在负荷水平不变条件下的状态概率

Tab.5 State probability of transmission line with TCSC when load level is constant

时段	负荷系数	$P_{Lk,T}$	$P_{Ll,T}$	$P_{L0,T}$	$Q_{L,T}$
02:00—03:00	1	0.977 29	$2.52 \times 10^{-7}$	0.014 81	0.007 90
06:00—07:00	1	0.973 35	$6.24 \times 10^{-8}$	0.014 75	0.011 90
10:00—11:00	1	0.972 14	$6.19 \times 10^{-8}$	0.014 73	0.013 13
14:00—15:00	1	0.971 00	$6.19 \times 10^{-8}$	0.014 71	0.014 28
18:00—19:00	1	0.970 01	$6.10 \times 10^{-8}$	0.014 70	0.015 30
22:00—23:00	1	0.968 34	$5.09 \times 10^{-8}$	0.014 67	0.016 99

表 6 含 TCSC 线路在负荷水平变化条件下的状态概率  
Tab.6 State probability of transmission line with TCSC when load level changes

时段	负荷系数	$P_{L,T}$	$P_{L,T}$	$P_{I0,T}$	$Q_{L,T}$
02:00—03:00	0.60	0.97965	$4.87 \times 10^{-7}$	0.01484	0.00551
06:00—07:00	0.74	0.97897	$4.87 \times 10^{-7}$	0.01483	0.00619
10:00—11:00	0.96	0.97820	$4.87 \times 10^{-7}$	0.01482	0.00697
14:00—15:00	0.93	0.97744	$4.86 \times 10^{-7}$	0.01481	0.00775
18:00—19:00	1.00	0.97655	$4.86 \times 10^{-7}$	0.01480	0.00865
22:00—23:00	0.73	0.97585	$4.85 \times 10^{-7}$	0.01478	0.00937

但是当 24 h 内负荷水平随时间变化时,线路故障率不仅随时间变化,也受负荷水平变化的影响,如表 6 所示。

#### 4.2 不同负荷水平下的电网日运行风险评估

本文使用交流潮流负荷削减模型对不含 TCSC 和含 TCSC 的电网运行风险进行评估,系统状态选取采用状态枚举法,发输电故障枚举到 3 阶。不含 TCSC 和含 TCSC 系统在不同负荷水平下的日运行风险评估结果如图 11、12 所示。其中,LOLP 是失负荷概率,EENS 是电量不足期望。

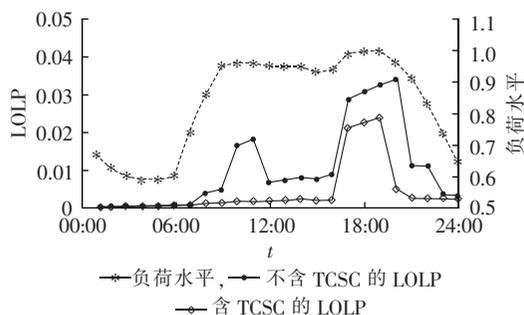


图 11 系统 LOLP 随时间变化曲线

Fig.11 Curves of system LOLP vs. time

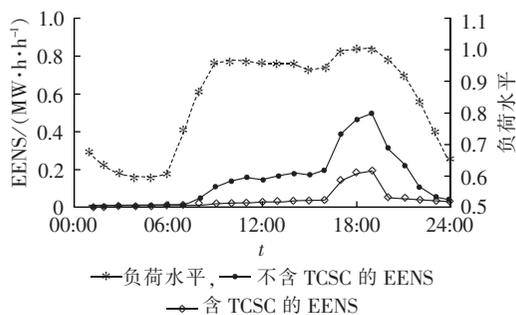


图 12 系统 EENS 随时间变化曲线

Fig.12 Curves of system EENS vs. time

负荷水平较大时的系统风险指标明显大于负荷水平低时的系统风险指标。在 09:00—20:00 时段,虽然负荷水平变化较小,但系统风险指标随时间增加呈逐渐增大趋势。安装 TCSC 后,系统风险指标比安装前明显减小,负荷水平较高时(09:00—20:00)尤其明显。这主要是因为 TCSC 通过调节潮流缓解了输电堵塞,从而使系统中的故障状态数减小或者某些故障状态的负荷削减量减小。因此 TCSC 能有

效改善系统可靠性水平,而它自身的可靠性对系统可靠性影响很小。

为进一步研究 TCSC 对系统可靠性的影响,本文计算了不同峰值负荷下系统 24 h 的风险指标,并列出了 18:00—19:00 时段系统的风险指标,如表 7、8 所示。其中,LOLP<sub>1</sub>、LOLP<sub>2</sub>、 $\Delta$ LOLP 分别为不含 TCSC 和含 TCSC 的失负荷概率以及失负荷概率变化量;EENS<sub>1</sub>、EENS<sub>2</sub>、 $\Delta$ EENS 分别为不含 TCSC 和含 TCSC 的电量不足期望以及电量不足期望变化量。

表 7 不同峰值负荷下的系统 LOLP

Tab.7 System LOLP for different peak loads

峰值负荷百分数/%	LOLP <sub>1</sub>	LOLP <sub>2</sub>	$\Delta$ LOLP
90	0.0099295	0.0025358	0.0073937
95	0.0116198	0.0035788	0.0080410
100	0.0326391	0.0241186	0.0085205
105	0.0646002	0.0465813	0.0180189
110	0.0903613	0.0524899	0.0378714
115	0.1273652	0.0988088	0.0285564

表 8 不同峰值负荷下的系统 EENS

Tab.8 System EENS for different peak loads

峰值负荷百分数/%	EENS <sub>1</sub> /(MW·h·h <sup>-1</sup> )	EENS <sub>2</sub> /(MW·h·h <sup>-1</sup> )	$\Delta$ EENS/(MW·h·h <sup>-1</sup> )
90	0.18593	0.04505	0.14088
95	0.25609	0.05249	0.20360
100	0.49066	0.19312	0.29754
105	0.87932	0.38325	0.49607
110	1.73243	0.81379	0.91864
115	3.09395	1.40659	1.68736

由表 7 可知,当系统峰值负荷百分数小于 115%,含 TCSC 系统的 LOLP 指标远小于不含 TCSC 系统,且 LOLP 改善量随峰值负荷百分数增大而逐渐增大。然而,当系统负荷增大到一定程度(峰值负荷百分数为 115%)时,载流量的增大导致 TCSC 元件故障率增大,含 TCSC 系统的 LOLP 指标的改善效果有所下降。由表 8 可知,含 TCSC 系统的 EENS 指标小于不含 TCSC 系统,并在 TCSC 容量约束范围内,系统负荷越大,TCSC 的改善作用越明显。

#### 4.3 考虑元件老化的电网日运行风险评估

当线路等效服役时间较长时,线路进入损耗故障期,线路寿命分布参数  $\beta$  取为 8.1,  $T_{63\%}$  取为 40 a<sup>[19]</sup>。本文计算了线路等效服役时间为 5 a 和 30 a 时系统 24 h 的风险指标,并列出了 18:00—19:00 时段的系统风险指标,如表 9 所示。随着线路等效服役时间的增加,系统的风险指标增加,可见,线路老化对系统

表 9 不同线路等效服役时间下的系统风险指标

Tab.9 System risk index for different line equivalent service times

等效服役时间/a	LOLP	EENS/(MW·h·h <sup>-1</sup> )
5	0.0213239	0.13869
30	0.0214660	0.14013

可靠性产生了不利影响。

#### 4.4 考虑气温变化的电网日运行风险评估

图 13 为不考虑气温变化和考虑气温变化情况下不含 TCSC 系统的 EENS 曲线,系统峰值负荷取为原始数据的 115%。由图 13 可知,当负荷水平较低时,线路实时额定载流量很充裕,系统风险指标主要受负荷水平影响。当负荷水平较高时,计及气温变化的系统风险指标比不计及的低,尤其是在气温较低的时间段(18:00—20:00),此时的线路实时额定载流量远大于基于最恶劣天气的额定载流量。可见,系统负荷较大时,负荷水平和气温变化都对系统风险指标产生了影响。

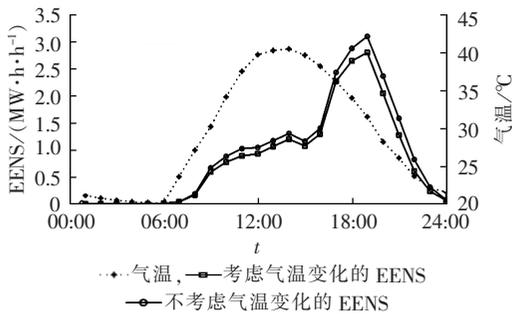


图 13 不含 TCSC 系统的 EENS 曲线

Fig.13 EENS curves of system without TCSC

当系统安装 TCSC 后,线路实时额定载流量较充裕,线路过载风险降低,考虑气温变化和不考虑气温变化的 EENS 变化曲线几乎重合,系统风险指标主要受负荷水平影响,如图 14 所示。

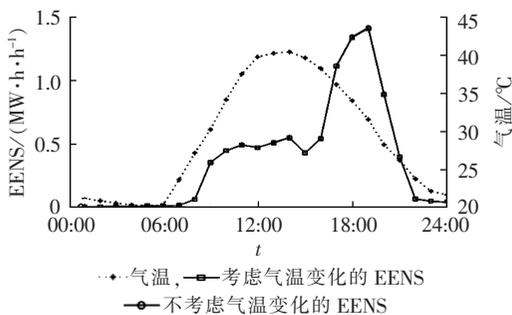


图 14 含 TCSC 系统的 EENS 曲线

Fig.14 EENS curves of system with TCSC

## 5 结论

本文结合 TCSC 的结构和故障模式,建立了 TCSC 的可靠性框图,详细分析了含 TCSC 线路的可靠性模型,然后推导出 TCSC 核心部件和整个线路在时变故障率参数下的状态概率计算公式,并建立了元件故障率模型,最后对 RTBS 测试系统在 24 h 的运行风险进行评估,得到如下结论。

a. 本文计及了元件故障率因运行条件改变而实时变化的特性,并基于此推导了元件的时变故障率,由该时变故障率得到的评估结果能够反映系统

风险与负荷水平、时间的关系。

b. 本文的模型考虑了元件服役时间和气温对元件运行可靠性的影响,评估结果更符合实际情况,可为运行人员提供有益的参考。

c. TCSC 能有效改善系统的可靠性水平,尤其对过载系统的可靠性水平改善明显。作为柔性交流输电系统中的重要元件,TCSC 可靠性参数是电力系统可靠性评估的基础,本文建立的模型可为柔性交流输电系统的运行风险预测提供理论支撑。

#### 参考文献:

- [1] 王树文,纪延超,马文川. 灵活交流输电技术[J]. 电力系统及其自动化学报,2007,19(3):113-117,121.  
WANG Shuwen,JI Yanchao,MA Wenchuan. Survey of flexible AC transmission system technology[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,19(3):113-117,121.
- [2] 何大愚. 柔性交流输电系统技术的发展要求其定义更新术[J]. 电力自动化设备,2004,24(10):79-82.  
HE Dayu. Development of flexible AC transmission & distribution system technology requires definition renewing[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(10):79-82.
- [3] 孙元章,曹明. FACTS 对多机系统静态电压稳定性的影响[J]. 电力自动化设备,2001,21(1):6-10.  
SUN Yuanzhang,CAO Ming. Effect of FACTS on static voltage stability of multi-machine power systems[J]. Electric Power Automation Equipment,2001,21(1):6-10.
- [4] BILLINTON R,FOTUHI-FIRUZABAD M,FARIED S O. Power system reliability enhancement using a thyristor controlled series capacitor[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1999,14(1):369-374.
- [5] FOTUHI-FIRUZABAD M,BILLINTON R,FARIED S O. Subtransmission system reliability enhancement using a thyristor controlled series capacitor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2000,15(1):443-449.
- [6] HUANG G M,LI Yishan. Impact of thyristor controlled series capacitor on bulk power system reliability[C]//Power Engineering Society Summer Meeting. Chicago,IL,USA:IEEE,2002:975-980.
- [7] VERMA A K,SRIVIDYA A,DEKA B C. Impact of a FACTS controller on reliability of composite power generation and transmission system[J]. Electric Power Systems Research,2004(72):125-130.
- [8] VERMA A K,SRIVIDYAA A,BHATKAR M V. A reliability based analysis of generation transmission system incorporating TCSC using fuzzy set theory[C]//IEEE International Conference. Mumbai,India:IEEE,2006:2779-2784.
- [9] 李立,鲁宗相,周双喜,等. 柔性交流输电系统设备对电力系统暂态失稳风险的影响[J]. 电力系统自动化,2012,36(6):11-16.  
LI Li,LU Zongxiang,ZHOU Shuangxi,et al. Impact of flexible AC transmission system device on power system transient instability risks[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(6):11-16.
- [10] SUN Y,WANG P,CHENG L,et al. Operational reliability assessment of power systems considering condition-dependent failure rate[J]. IET Generation Transmission & Distribution,2010,4(1):60-72.
- [11] SUN Yuanzhang,CHENG Lin,LIU Haitao,et al. Power system

- operational reliability evaluation based on real-time operating state[C]//Power Engineering Conference. Singapore:IEEE,2005:722-727.
- [12] 程林,何剑,孙元章. 线路实时可靠性模型参数对电网运行可靠性评估的影响[J]. 电网技术,2006,30(13):8-13.  
CHENG Lin,HE Jian,SUN Yuanzhang. Impact of transmission line's real-time reliability model parameter upon power system operational reliability evaluation[J]. Power System Technology, 2006,30(13):8-13.
- [13] 周孝信,郭剑波,林集明,等. 电力系统可控串联电容补偿[M]. 北京:科学出版社,2009:291-327.
- [14] 盛国钊,严飞,姜胜宝,等. 大容量电容器组桥差不平衡电流保护近似计算[J]. 电力电容器与无功补偿,2009,30(2):1-6.  
SHENG Guozhao,YAN Fei,JIANG Shengbao,et al. Approximate calculation of unbalance protection on differential current bridge of large capacity capacitor bank[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2009,30(2):1-6.
- [15] 余江,周红阳,赵曼勇. 高压电容器不平衡保护的相关问题[J]. 电力系统自动化,2006,30(13):86-89.  
YU Jiang,ZHOU Hongyang,ZHAO Manyong. Related problems of unbalance protection for high voltage capacitor[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(13):86-89.
- [16] 王永红,孟荣,王玥,等. 500 kV 变电站并联电容器组保护整定的若干问题[J]. 电力自动化设备,2010,30(8):144-147.  
WANG Yonghong,MENG Rong,WANG Yue,et al. Problems on settings of shunt capacitor bank protection in 500 kV substation[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(8):144-147.
- [17] 田秋松,张健毅,刘涛,等. 大型串联电容器组在特高压固定串补中的应用[J]. 电力电容器与无功补偿,2012,33(3):33-39.  
TIAN Qiusong,ZHANG Jianyi,LIU Tao,et al. Application of large-sized serial capacitor bank in UHV fixed series compensation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012,33(3):33-39.
- [18] PASERBA J J,MILLER N W,LARSEN E V,et al. A thyristor controlled series compensation model for power system stability analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1995,10(3):1471-1478.
- [19] ZHANG Xiang,GOCKENBACH E. Component reliability modeling of distribution systems based on the evaluation of failure statistics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2007,14(5):1183-1191.
- [20] 韩晓燕,黄新波,赵小惠,等. 输电线路摩尔根载流量简化公式的初步研究[J]. 电力系统及其自动化学报,2009,21(5):92-96.  
HAN Xiaoyan,HUANG Xinbo,ZHAO Xiaohui,et al. Preliminary study on Morgan transmission capacity simplified formula of transmission lines[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2009,21(5):92-96.
- [21] BILLINTON R S,CHOWDHURY N,CHU K,et al. A reliability test system for educational purposes-basic data(RBTS)[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1989,4(3):1238-1244.
- [22] 蓝元良,汤广福,武守远,等. 220 kV 成碧线可控串补晶闸管阀电气设计及仿真[J]. 电网技术,2006,30(4):11-15.  
LAN Yuanliang,TANG Guangfu,WU Shouyuan,et al. Electrical design and simulation of thyristor valves for thyristor controlled series compensation of 220 kV Chengbi transmission line[J]. Power System Technology,2006,30(4):11-15.

#### 作者简介:



赵 渊

赵 渊(1974-),男,四川三台人,教授,博士研究生导师,博士,从事电力系统规划与可靠性方面的研究工作(**E-mail**:yuanzhao@msn.cn);

邱玉良(1987-),女,四川自贡人,硕士研究生,从事电力系统规划与可靠性方面的研究工作(**E-mail**:qyliang2005@163.com);

宿晓岚(1969-),女,四川彭山人,高级工程师,从事电力系统规划方面的研究工作(**E-mail**:591191976@qq.com)。

## Operating risk assessment model of power grid with TCSC

ZHAO Yuan<sup>1</sup>, QIU Yuliang<sup>1</sup>, SU Xiaolan<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Urban Power Supply Branch Company of Chongqing Electric Power Corporation, Chongqing 400013, China)

**Abstract:** The structure and fault mode of TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) are analyzed, the reliability block diagram is constructed for TCSC and its submodules, and the reliability of submodule with redundant component configuration is discussed. The operational characteristics of TCSC reactance varying with current is analyzed, based on which, a line reliability model with the TCSC apparent reactance constraint is proposed. According to the time-varying characteristics of failure rate in real-time operating condition, the state probability calculation formulas are deduced based on Markov theory for the core components of TCSC and the entire lines. A conditional failure rate model is built based on the operating risk theory, which quantitatively considers the impact of random load fluctuation, component aging and temperature variation on the reliability of components. The reliability of RBTS test system is calculated and analyzed, verifying the effectiveness and correctness of the proposed model.

**Key words:** TCSC; reliability block diagram; operational risk; real-time operating condition; models