

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201448

# 基于预防检修周期优化的电网稳定控制系统失效风险评估

颜云松<sup>1</sup>, 孙宁<sup>1</sup>, 张楠<sup>2</sup>, 李生虎<sup>2</sup>

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

2. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 随着大型电网互联, 迫切需要安全稳定控制系统(简称稳控系统)更加可靠。预防性检修有助于降低稳控系统失效风险。从底层模块开始, 建立稳控系统故障树, 计算其失效概率。考虑隐性故障和预防性检修, 建立稳控系统状态空间模型。以可靠系数和经济成本可靠系数为目标、以状态概率为等式约束、以可行检修周期和允许年均经济损失为不等式约束, 首次建立优化模型, 以求解最优检修周期。根据拉格朗日乘子, 提出目标函数对检修周期约束的灵敏度。相对于连续修改参数方法, 所提优化及其灵敏度算法计算效率高, 且可处理多个变量。算例结果验证了所提模型和算法的可行性和应用价值。

**关键词:** 安全稳定控制系统; 失效风险; 预防检修周期; 最优化; 灵敏度

## Evaluation of unavailability risk of the security and stability control system of power systems based on optimization of the preventive maintenance period

YAN Yunsong<sup>1</sup>, SUN Ning<sup>1</sup>, ZHANG Nan<sup>2</sup>, LI Shenghu<sup>2</sup>

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

2. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Interconnection of bulk power systems needs a reliable Security & Stability Control System (SSCS). Preventive maintenance may help to reduce the unavailability of the SSCS. In this paper, the fault tree of the SSCS is derived from lower level components to obtain the failure probability of the SSCS. This includes hidden failure and preventive maintenance. The state space model of the SSCS is derived. With the object of the reliability coefficient and the economic cost reliability coefficient, the equality constraints of the state probabilities, and the inequality constraints of the feasible range of the maintenance period and the acceptable annual economic loss, an optimization model is proposed to find the optimal maintenance period. Based on Lagrange multipliers, the sensitivities of the objective function to the constraints of the maintenance period are derived. Compared with the continually modifying parameters, the proposed optimization and sensitivity models are more efficient, and can handle multiple parameters. The numerical results show the feasibility and the application value of the proposed models.

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

**Key words:** security and stability control system; unavailability risk; preventive maintenance period; optimization; sensitivity

## 0 引言

随着大型电网互联以及高压直流、柔性交流、

风电、光伏等设备越来越多, 电网故障后果可能更加严重。安全稳定控制系统(以下简称稳控系统)有助于维持功角、频率和电压稳定, 避免大面积停电等<sup>[1-6]</sup>。根据预设稳控策略表的换流站控制, 也是稳控系统的一部分<sup>[7-8]</sup>。稳控系统失效风险增加, 将严重威胁电网可靠和经济运行<sup>[9-12]</sup>。

现有对稳控系统可靠性/失效风险的研究方法,

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

包括蒙特卡罗抽样<sup>[13-14]</sup>、故障树<sup>[15-16]</sup>、状态空间<sup>[17-18]</sup>等。在对稳控系统可靠性建模方面：文献<sup>[19-20]</sup>从设备跳闸判据、控制模式、通信通道、运行模式和总体架构等方面，探讨了可靠性研究思路，但未给出具体模型与指标；文献<sup>[21]</sup>将故障树和状态空间法相结合，建立了安全稳定控制装置硬件系统模型，但仅考虑单套装置；文献<sup>[22]</sup>以蒙特卡罗法为基础，分析了南瑞 SCS-500E 安全稳定控制装置可靠性，但认为顶事件故障概率为各次级事件故障概率之和，结果略有误差。而且上述研究对象为稳控装置，未从系统层面进行风险评估。

考虑稳控系统中部件故障与设计维护有关且具有随机性，因此可采取预防性定期检修来提高可靠性。过于频繁或极少预防检修，都可能增加系统失效风险，因此存在预防检修的最优值。进一步考虑，预防性检修在降低系统失效风险同时，增加了维护成本。因此，需要综合考虑可靠性和经济性因素，来确定最优检修周期，即经济损失尽可能小且可靠性指标较高<sup>[23-24]</sup>。通过连续修改参数、比较可靠性成本，可以得到最优检修周期，但是计算效率极低<sup>[25-26]</sup>。引入优化算法可以求取多个约束下检修周期最优值，但是目前未见相关研究。

进一步，最优检修周期约束上(下)限取值不同，目标函数最优值也可能不同。对此问题，可以修改约束上(下)限，重复优化计算，但是计算效率很低。实际上，优化问题的拉格朗日乘子，可以反映目标函数对约束上(下)限的灵敏度，但是目前也未见相关研究。

本文从底层模件开始，建立稳控系统故障树，计算其失效概率。考虑隐性故障和预防性检修，建立稳控系统状态空间模型。以可靠系数和经济成本可靠系数为目标，以状态概率为等式约束，以可行检修周期和允许年均经济损失为不等式约束，首次建立优化模型以求解最优检修周期。根据拉格朗日乘子，提出目标函数对检修周期约束的灵敏度。相对于连续修改参数方法，所提优化及其灵敏度算法，计算效率高，且可处理多个变量。以南瑞 SCS-500E 安全稳定控制装置为例进行分析，验证了所提模型的可行性和应用价值。

### 1 安全稳定控制系统失效风险建模

电网稳控系统包括硬件和软件，本文主要研究其硬件结构，建立失效风险模型。考虑到底层元件参数往往为不可用率，因此首先基于 FTA 模型得到稳控系统失效风险，然后根据修复率反推故障率，最后建立稳控系统状态空间模型，计算失效风险。

#### 1.1 稳控系统 FTA 建模

稳控系统架构较为复杂。如果考虑同一层级内单厂站多套装置、多厂站多套装置以及多套装置间的配合关系等因素，建模难度太大。以下考虑对稳控系统失效影响较大因素，同时为满足 FTA 划分要求，对稳控系统总体架构作如下简化：(1) 控制主站、控制子站和执行站的核心设备采用南瑞 SCS-500E 稳控装置；(2) 同一厂站采取双套稳控装置的冗余设计，双套装置间为并列关系；(3) 稳控系统控制和决策模式由其总体结构决定。

根据上述逻辑关系可知，同一层级厂站内部两套稳控装置(A, B)互为备用。两者都故障时，该层级站故障。控制主站、控制子站和执行站在稳控系统中各司其职，功能互相独立。通信通道用于各站点间传递/反馈指令。当四者其中之一故障时，稳控系统故障。由此得到稳控系统的 FTA 模型，如图 1 所示。

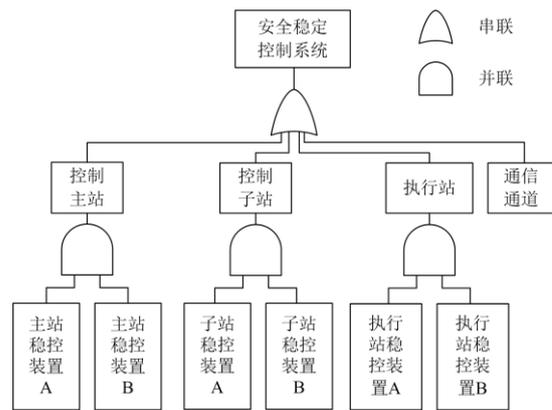


图 1 稳控系统 FTA 模型

Fig. 1 FTA model of security and stability control system

将图 1 进一步细化，划分为 4 个层级：装置层级、单元层级、子单元层级、模件层级。装置层级 SCS-500E 稳控装置采用分散式结构，包括主控单元、I/O 单元和通信单元，主控单元为装置的枢纽环节，I/O 单元为装置向外输出指令的接口，通信单元将主控单元通过光纤通道传输的指令进行转换。本文采用的 I/O 单元和通信单元最大配置为 6 个 I/O 子单元和 2 个子通信单元，忽略各子单元故障对上层单元影响的差异，认为任一子单元故障均会导致上层单元故障，模件层级与子单元层级的关系同理。综上所述，SCS-500E 稳控装置 FTA 模型见图 2。

进行 FTA 概率评估时，需要区分事件串、并联关系。对由  $a$  个模件组成的串联系统，任一模件  $i(i = 1, 2, \dots, a)$  故障都会导致串联系统故障。定义  $P_i$

表示模块  $i$  的故障概率, 得串联系统的故障概率  $P_s$  为

$$P_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \quad (1)$$

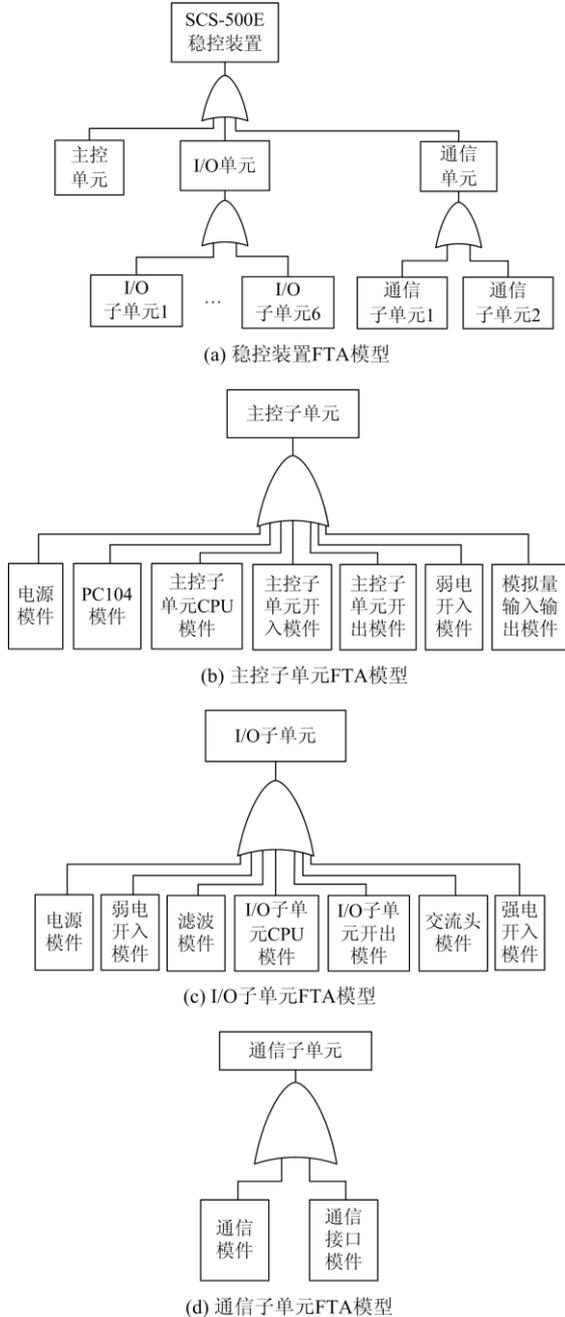


图2 SCS-500E 稳控装置 FTA 模型

Fig. 2 FTA model of SCS-500E

对并联系统, 当且仅当所有模块故障时, 系统才会故障。由此得并联系统故障概率  $P_r$  为

$$P_r = \prod_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

需要说明的是, 串并联系统故障是指系统所处

的状态, 对应系统运行状态。具体到稳控系统故障, 可以理解为稳控系统功能失效, 当电网发生故障时, 无法采取稳控措施以消除故障, 保障电网的安全稳定运行。

根据稳控系统 FTA 各层级模块逻辑关系, 可得稳控系统故障概率  $P_{sys}$ 。若其修复率为  $\mu$ , 则初始运行方式下, 系统故障率  $\lambda$  为

$$\lambda = \frac{\mu}{1 - P_{sys}} - \mu \quad (3)$$

### 1.2 Markov 状态空间模型

利用 FTA 法求得失效风险模型仅有正常和故障两状态。但事实上稳控系统可能更为复杂。例如, 若连接控制子站和执行站的通信通道故障, 可跳过控制子站环节, 仅需控制主站与执行站间传递指令, 此时稳控系统仍可正常运行。因此, 本文增加隐性故障, 包括隐性拒动和隐性误动两状态。然后考虑定期检修, 假设隐性拒动和隐性误动状态经过定期检修后, 均可被发现并修复, 恢复正常运行状态。

建立稳控系统五状态空间模型, 如图3所示, 其中  $s_1$ — $s_5$  分别表示稳控系统正常运行、隐性误动、隐性拒动、故障停运和定期检修状态,  $\alpha_1$  为故障检出系数,  $\alpha_2$  为未检出故障情况下引发的误动次数占误动与拒动次数之和的百分比,  $\alpha_3$  和  $\alpha_4$  分别为隐性误动和隐性拒动两状态间的转移率,  $\lambda_e$  为误动故障状态转移率<sup>[15]</sup>,  $T$  为定期检修周期,  $\mu_{41}$  为故障状态修复率,  $\mu_{51}$  为对稳控系统定期进行检修时间的倒数,  $t_{25}$  为发生误动后检修人员到现场平均时间的倒数。

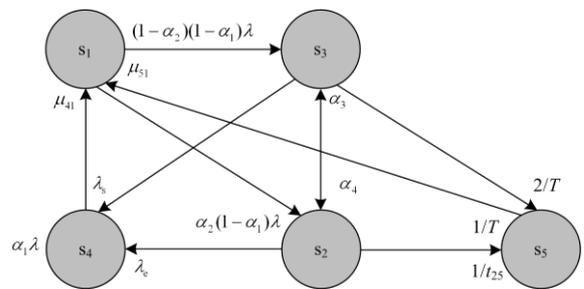


图3 稳控系统状态空间模型

Fig. 3 State space of security and stability control system

上述状态空间的转移率矩阵  $A$  为

$$A = \begin{bmatrix} -a_{11} & \alpha_2(1-\alpha_1)\lambda & (1-\alpha_2)(1-\alpha_1)\lambda & \alpha_1\lambda & 1/T \\ 0 & -a_{22} & \alpha_3 & \lambda_e & 1/t_{25} \\ 0 & \alpha_4 & -a_{33} & \lambda_r & 1/t_{35} \\ \mu_{41} & 0 & 0 & -a_{44} & 0 \\ \mu_{51} & 0 & 0 & 0 & -a_{55} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $a_{11} = \lambda + 1/T$ ;  $a_{22} = \alpha_3 + \lambda_e + 1/t_{25}$ ;  $a_{33} = \alpha_4 + \lambda_r + 1/t_{35}$ ;  $a_{44} = \mu_{41}$ ;  $a_{55} = \mu_{51}$ ;  $\lambda_r$  为触发隐性拒动故障转移率;  $t_{35}$  为发生拒动后检修人员到现场平均时间的倒数。

令  $\mathbf{P} = [P_1, P_2, P_3, P_4, P_5]$ , 其中元素为系统处于  $s_1 \sim s_5$  的概率, 根据  $\mathbf{PA} = \mathbf{0}$ , 以及概率之和为 1 的性质, 可由式(5)求解得到。

$$\mathbf{P} = \mathbf{D}^{-1}\mathbf{B} = \Phi\mathbf{B} \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{D}$  矩阵由  $\mathbf{A}$  矩阵转置后最后一行元素全部替换为 1 得到;  $\mathbf{B}$  矩阵为最后一个元素替换为 1 的零矩阵, 行数和列数分别为 5 和 1;  $\Phi$  矩阵为  $\mathbf{D}$  的逆矩阵。

由此得到系统不可用率  $U$ 、误动率  $P_w$ 、拒动率  $P_j$  和运行失效率  $B$  分别为

$$U = P_4 \quad (6)$$

$$P_w = P_2 \quad (7)$$

$$P_j = P_3 \quad (8)$$

$$B = P_2 + P_3 \quad (9)$$

式中:  $U$  表示稳控系统发生功能失效的概率;  $P_w$  和  $P_j$  分别表示稳控系统发生误动和拒动的概率;  $B$  表示稳控系统在运行状态下发生功能失效的概率, 为  $P_w$  和  $P_j$  之和。

## 2 安全稳定控制系统优化及灵敏度分析

### 2.1 对预防检修周期的优化模型

考虑优化预防检修周期  $T$  以降低稳控系统失效风险。考虑  $T$  变化对稳控系统误动率和拒动率的影响, 引入稳控系统可靠系数  $K$ <sup>[27-28]</sup>。

$$K = 1 - \frac{B^2 + U^2}{B + U} \quad (10)$$

以稳控系统故障损失和维护成本为优化目标, 则系统年均经济损失  $C$  包括系统误动产生损失  $C_w$ 、系统拒动产生损失  $C_j$  和定期检修产生成本  $C_m$ , 如式(11)~式(14)。

$$C = C_w + C_j + C_m \quad (11)$$

$$C_w = \alpha_2(1 - \alpha_1)\lambda P_1 \left( L_{wf} + L_{wt} \left( t_{25} + \frac{1}{\mu_{51}} \right) \right) \quad (12)$$

$$C_j = \lambda_r P_1 \left( L_{jf} + L_{jt} \left( t_{35} + \frac{1}{\mu_{51}} \right) \right) \quad (13)$$

$$C_m = \frac{P_1}{T} \left( L_{mf} + \frac{L_{mt}}{\mu_{51}} \right) \quad (14)$$

式中:  $L_{wf}$ 、 $L_{jf}$  和  $L_{mf}$  分别为稳控系统误动、拒动和检修一次的成本;  $L_{wt}$ 、 $L_{jt}$  和  $L_{mt}$  分别为稳控系统误

动、拒动和检修造成停电(假设稳控系统处于检修状态时均需要停电)带来的单位时间经济损失<sup>[28]</sup>。

定期检修周期  $T$  过小时, 有可能大幅增加检修成本  $C_m$ , 导致  $C$  增大; 定期检修周期  $T$  过大时, 可能增加稳控系统发生拒动和误动的次数, 导致系统出现潜在的安全隐患。因此, 只有当  $T$  在适当范围内取值时, 才会使稳控系统的可靠性和经济性同时趋于最优, 引入经济成本可靠系数  $E$ <sup>[27]</sup>。

$$E = \frac{C}{K} \quad (15)$$

分别考虑上述两种情况, 选取目标函数  $f_1$  和  $f_2$ , 如式(16)、式(17)所示。

$$\min f_1 = 1 - K = \frac{B^2 + U^2}{B + U} \quad (16)$$

$$\min f_2 = E = \frac{C_w + C_j + C_m}{1 - (B^2 + U^2)/(B + U)} \quad (17)$$

等式约束为式(5)。对于不等式约束, 检修周期  $T$  不能超过上下限  $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 。为避免频繁检修增加检修成本  $C_m$ , 使  $C$  过大, 设置  $C$  上限  $C_{\max}$ 。综上, 不等式约束为

$$\begin{cases} T_{\min} \leq T \leq T_{\max} \\ 0 \leq C \leq C_{\max} \end{cases} \quad (18)$$

### 2.2 对预防检修周期结果的灵敏度分析

当  $T \in [1, T_{\max}]$  时, 目标函数  $f_1$  和  $f_2$  随  $T$  的大小发生变化, 除此之外,  $T_{\min}$  和  $T_{\max}$  变化可能对目标函数产生影响。对于  $f_1$  和  $f_2$  对  $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$  的灵敏度, 其物理意义为放宽  $T$  不等式约束的边界对目标函数的边际影响<sup>[29]</sup>, 当最优检修周期与  $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$  相差越小,  $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$  变化对目标函数影响越大。

保持其他约束不变, 只改变  $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$ , 可将  $f_1$  和  $f_2$  视为  $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$  的函数。忽略高阶项, 目标函数变化量为

$$\begin{cases} \Delta f_1 = \frac{\partial f_1}{\partial T_{\max}} \Delta T_{\max} + \frac{\partial f_1}{\partial T_{\min}} \Delta T_{\min} \\ \Delta f_2 = \frac{\partial f_2}{\partial T_{\max}} \Delta T_{\max} + \frac{\partial f_2}{\partial T_{\min}} \Delta T_{\min} \end{cases} \quad (19)$$

式中,  $\Delta$  表示变化量。

## 3 算例分析

SCS-500E 稳控装置模件故障概率见表 1<sup>[20]</sup>。各站间通信采用光纤, 为简化计算, 忽略光纤通道长度差, 取其故障概率为 0.000 25。经济损失参考文献[30]。虽然稳控系统经济损失与电网结构、负荷水平、停电时间长短等因素相关, 本文所提优化模型稍加修改即可适用于不同经济损失数据。

### 3.1 FTA 模型

根据 FTA 模型, 得到稳控系统各层级模块故障概率, 见图 4。其中稳控系统故障概率大于控制主站、控制子站和执行站故障概率, 因为下级各厂站各司其职, 任一环节发生故障都会导致稳控系统故障。稳控系统故障概率比单一稳控装置故障概率低很多, 相差约 500 倍, 说明同一厂站配置双套稳控装置, 降低了稳控系统失效风险。

表 1 底层模块故障概率

Table 1 Unavailability of lower-level components

模块编号	稳控模块	故障概率
1	电源模块	$4.4 \times 10^{-5}$
2	PC104 模块	$6.4 \times 10^{-5}$
3	主控子单元 CPU 模块	$4.8 \times 10^{-4}$
4	主控子单元开入模块	$7.6 \times 10^{-4}$
5	主控子单元开出模块	$6.0 \times 10^{-5}$
6	弱电开入模块	$3.8 \times 10^{-4}$
7	模拟量输入输出模块	$4.2 \times 10^{-4}$
8	滤波模块	$1.8 \times 10^{-5}$
9	I/O 子单元 CPU 模块	$4.0 \times 10^{-5}$
10	I/O 子单元开出模块	$5.0 \times 10^{-5}$
11	交流头模块	$2.9 \times 10^{-5}$
12	强电开入模块	$1.3 \times 10^{-4}$
13	通信模块	$1.0 \times 10^{-3}$
14	通信接口模块	$6.0 \times 10^{-4}$

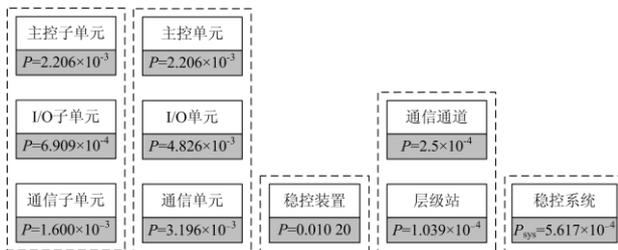


图 4 各层级模块的故障概率

Fig. 4 Unavailability of modules at each level

### 3.2 优化结果

定期检修周期  $T$  对目标函数  $f_1(f_1=1-K)$  的影响如图 5 所示。可以看出, 随着  $T$  的不断增大,  $f_1$  先大幅减小, 达到最小值后再缓慢增加, 且增加的幅度逐渐减小。当  $T=1\ 207\ \text{h}$  时,  $\min f_1=0.031\ 6$ , 可靠系数  $K=0.999\ 4$ 。

稳控系统失效率和不可用率随  $T$  的变化如图 6 所示。随着  $T$  增大, 系统失效率  $B$  逐渐增大, 这是因为失效率即为故障停运概率, 检修周期变长时, 稳控系统的故障停运状态经过定期检修转化为正常运行状态的个数减小。随着  $T$  增大, 不可用率  $U$  先大幅减小, 后缓慢增大, 与目标函数  $f_1$  随  $T$  的变化关系大致相同, 说明  $T$  在  $[0, 1\ 000]$  h 范围内增大时,

能有效减小系统误动和拒动概率,  $T$  继续增大时, 反而会导致系统发生误动和拒动的次数变多。

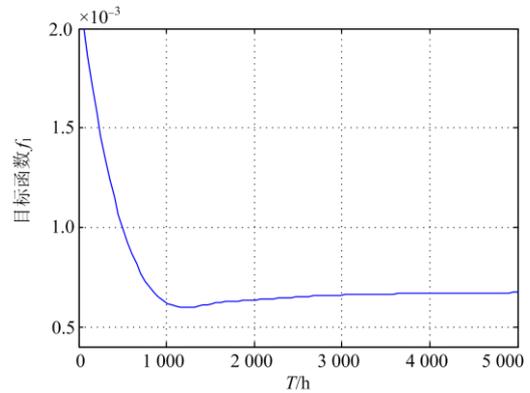
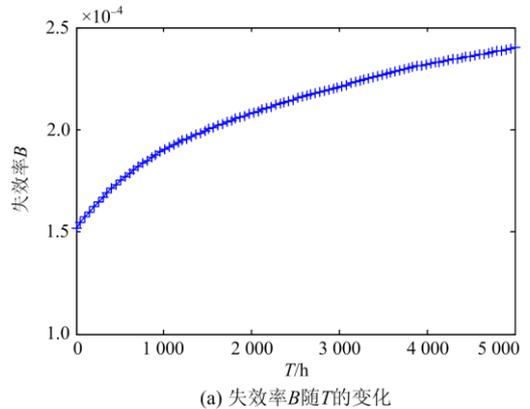
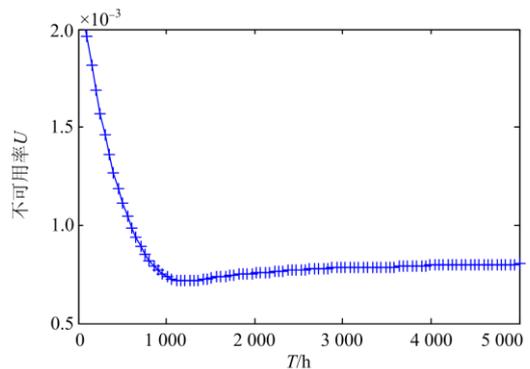


图 5 定期检修周期  $T$  对目标函数  $f_1$  的影响

Fig. 5 Influence of routine test interval  $T$  to  $f_1$



(a) 失效率  $B$  随  $T$  的变化



(b) 不可用率  $U$  随  $T$  的变化

图 6 系统指标随定期检修周期  $T$  的变化

Fig. 6 Change of system indices with the routine test interval  $T$

年均经济损失  $C$  及各分量 ( $C_m$ 、 $C_j$ 、 $C_w$ ) 随  $T$  的变化如图 7 所示, 其中最上方曲线反映了定期检修周期  $T$  对目标函数  $f_2(f_2=E)$  的影响, 当  $T=3\ 165\ \text{h}$  时,  $\min f_2=79.3\ \text{万元} \cdot \text{年}^{-1}$ , 经济成本可靠系数  $E=79.3\ \text{万元} \cdot \text{年}^{-1}$ 。定期检修成本  $C_m$  变化与  $E$  保持一致, 而系统拒动损失  $C_j$  和误动损失  $C_w$  随  $T$  增大而

增加,说明检修周期增大,导致稳控系统拒动和误动发生次数增加。

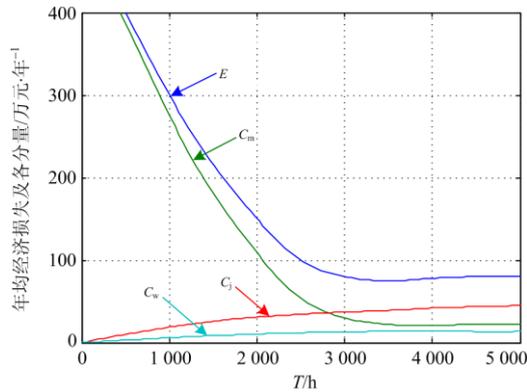


图7 年均经济损失及各分量随检修周期  $T$  的变化

Fig. 7 Change of annual economic loss and each part with the routine test interval  $T$

对比图5和图6,其优化结果如表2所示。可以看出,右列数据相对于左列数据,最优检修周期  $T$  较大,可靠系数  $K$  较小,经济成本可靠系数  $E$  较大,并且当以  $E$  为目标函数时,成本降低了约240%,而可靠性仅降低约0.009%,说明此种情况下,稳控系统可靠性和经济性更可能同时趋于最优。

表2 不同目标函数下优化结果

Table 2 Optimization results with different objects

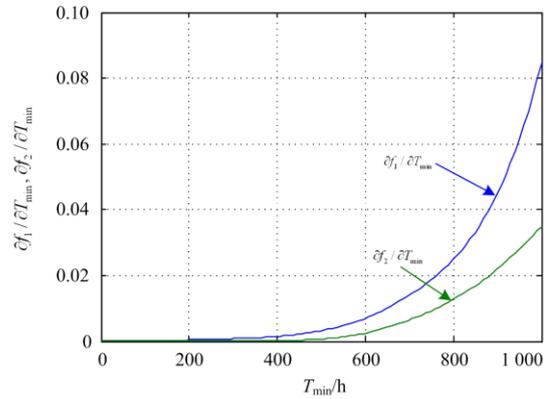
结果	目标函数 $f_1=1-K$	目标函数 $f_2=E$
$P_1$	0.993 4	0.997 4
$P_2$	$8.717 \times 10^{-5}$	$8.753 \times 10^{-5}$
$P_3$	$8.717 \times 10^{-5}$	$8.753 \times 10^{-5}$
$P_4$	$7.021 \times 10^{-4}$	$8.042 \times 10^{-4}$
$P_5$	$5.764 \times 10^{-3}$	$1.601 \times 10^{-3}$
$T/h$	1 207	3 165
$K$	0.999 40	0.999 31
$E/万元 \cdot 年^{-1}$	268.75	79.30

### 3.3 灵敏度分析

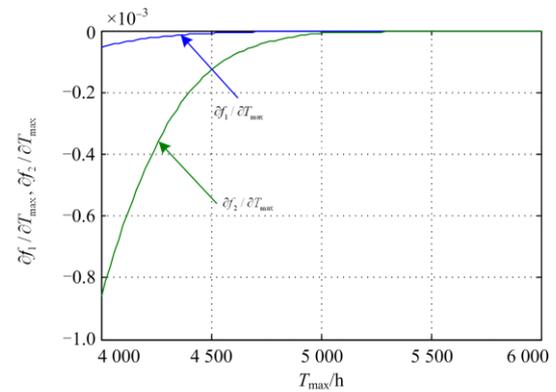
设置  $T$  约束下限  $T_{\min}=100$  h,上限  $T_{\max}=5\,000$  h,计算得到:  $\partial f_1/\partial T_{\min}=2.274 \times 10^{-4}$ ,  $\partial f_2/\partial T_{\min}=1.509 \times 10^{-5}$ ,  $\partial f_1/\partial T_{\max}=8.615 \times 10^{-7}$ ,  $\partial f_2/\partial T_{\max}=9.263 \times 10^{-6}$ 。

改变  $T_{\min}$  和  $T_{\max}$  的大小,  $f_1$  和  $f_2$  对  $T_{\min}$  和  $T_{\max}$  的灵敏度变化曲线如图8所示。由图8(a)可知,随着  $T_{\min}$  的增大,  $\partial f_1/\partial T_{\min}$  和  $\partial f_2/\partial T_{\min}$  随之增大,且均为正值,说明当  $T$  的变化范围缩小时,会导致目标函数变大,并且可以看出,  $\partial f_1/\partial T_{\min}$  较大,这是因为在取  $f_1$  为目标函数,  $T$  的最优解为 1 207 h 时,相较于取  $f_2$  为目标函数  $T$  的最优解为 3 165 h,  $T$  的最

优解更加靠近图8(a)中所取的下边界。图8(b)中对  $\partial f_1/\partial T_{\max}$  和  $\partial f_2/\partial T_{\max}$  变化曲线的分析同理。



(a)  $f_1$ 和 $f_2$ 对 $T_{\min}$ 的灵敏度



(b)  $f_1$ 和 $f_2$ 对 $T_{\max}$ 的灵敏度

图8 目标函数  $f_1$ 、 $f_2$  随  $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$  的变化

Fig. 8 Variations of  $f_1$  and  $f_2$  with  $T_{\min}$  and  $T_{\max}$

## 4 结论

本文建立电网安全稳定控制系统失效风险评估模型,从仅考虑系统可靠性和同时考虑系统可靠性经济性两方面,提出预防检修周期优化模型。根据拉格朗日乘子,提出目标函数对检修周期约束的灵敏度。得到以下结论:

- 1) 稳控系统的底层模件故障时,会导致系统功能的可靠性降低。当具有单站双套等冗余配置时,稳控系统故障概率明显降低。
- 2) 以经济成本可靠系数为目标函数进行优化时,预防性定期检修周期  $T$  偏大,可靠性有小幅降低的同时,极大节约了总成本。
- 3) 若调节  $T_{\min}$  和  $T_{\max}$  对目标函数的边际改善量相同,仅考虑降低稳控系统失效风险时,  $T_{\min}$  的调节量更小,同时考虑失效风险和经济成本时,  $T_{\max}$  的调节量更小。

## 参考文献

- [1] SHU Y, TANG Y. Analysis and recommendations for the adaptability of China's power system security and stability relevant standards[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(4): 334-339.
- [2] YU W, XUE Y, LUO J. An UHV grid security and stability defense system: considering the risk of power system communication[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 7(1): 491-500.
- [3] 郝雨辰, 江叶峰, 仇晨光, 等. 基于多代理系统的直流微电网分区域式稳定控制方法研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(5): 15-20.  
HAO Yuchen, JIANG Yefeng, QIU Chenguang, et al. Research on sub-regional stability control of dc microgrid based on multi-agent system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(5): 15-20.
- [4] 郭剑, 朱炳铨, 徐泰山, 等. 基于历史数据聚类分析的暂态功角稳定故障筛选[J]. 电力工程技术, 2020, 39(2): 75-80.  
GUO Jian, ZHU Bingquan, XU Taishan, et al. Transient power angle stability contingency screening based on clustering analysis of historical data[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(2): 75-80.
- [5] 时伯年, 孙刚, 瞿艳霞. 柔性直流输电的孤网频率稳定协调控制[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(4): 137-142.  
SHI Bonian, SUN Gang, QU Yanxia. Research on coordinated frequency stability control after islanding based on VSC-HVDC technique[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4): 137-142.
- [6] 张国辉, 李其莹, 张海静, 等. 基于电压灵敏度的交直流系统源网协调电压优化控制[J]. 智慧电力, 2019, 47(4): 66-72, 80.  
ZHANG Guohui, LI Qiyang, ZHANG Haijing, et al. Sensitivity-based optimal source-grid coordinated voltage control in AC/DC hybrid system[J]. Smart Power, 2019, 47(4): 66-72, 80.
- [7] XU Y. Measures to ensure the security and stability of the Central China power system[C] // International Conference on Power System Technology, October 13-17, 2002, Kunming, China: 1374-1377.
- [8] ZHANG F, MU L. New protection scheme for internal fault of multi-microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(2): 159-170. DOI: 10.1186/s41601-019-0127-3.
- [9] 李碧君, 董希建, 颜云松, 等. 基于控制功效受损模式的大型稳控系统可靠性评估[J]. 中国电力, 2020, 53(5): 32-38.  
LI Bijun, DONG Xijian, YAN Yunsong, et al. Reliability Assessment of large scale security and stability control system based on control efficacy reduction mode[J]. Electric Power, 2020, 53(5): 32-38.
- [10] 吕亚洲, 霍超, 吴兴扬, 等. 计及 FACTS 的暂态安全稳定紧急控制策略[J]. 中国电力, 2019, 52(1): 96-101.  
Lǚ Yazhou, HUO Chao, WU Xingyang, et al. Transient stability emergency control strategy considering FACTS[J]. Electric Power, 2019, 52(1): 96-101.
- [11] LI B, HE J, LI Y. A review of the protection for the multiterminal VSC-HVDC grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 239-249. DOI: 10.1186/s41601-019-0136-2.
- [12] HE X, DAI R, CAO G. The research and application of stability control system operated on Qipanqing Industrial Park isolated power system[C] // China International Conference on Electricity Distribution, August 10-13, 2016, Xi'an, China.
- [13] 郭雨涵, 蒋雪冬, 黄道姗, 等. 基于多目标蒙特卡洛法的全电压序列一体化电网可靠性评估[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2866-2870.  
GUO Yuhan, JIANG Xuedong, HANG Daoshan, et al. Reliability evaluation of whole voltage level integrated power grid based on multi-objective Monte-Carlo method[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2866-2870.
- [14] YAN C, DING T, BIE Z H. A geometric programming to importance sampling for power system reliability evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 1568-1569.
- [15] 席禹, 陈波, 郭晓斌, 等. 基于 IEC61850 配电系统自动化可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 129-135.  
XI Yu, CHEN Bo, GUO Xiaobin, et al. Reliability assessment of distribution automation based on IEC61850[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 129-135.
- [16] 成卫东, 刘云, 冷杉. 安全仪控系统分布式控制器可靠性研究[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 165-169.  
CHENG Weidong, LIU Yun, LENG Shan. Reliability of distributed controller in safety I&C system[J]. Electric Power Automatic Equipment, 2014, 34(2): 165-169.
- [17] 周虎兵, 张焕青, 杨增力, 等. 二次系统隐性故障的多指标综合风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 120-127.  
ZHOU Hubing, ZHANG Huanqing, YANG Zengli, et al. Multi-criteria integrated risk assessment of secondary system hidden failures[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 120-127.

[18] 田爱娜, 李卫星, 刘道伟, 等. 基于改进状态空间模型的空调负荷控制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 124-130.  
TIAN Aina, LI Weixing, LIU Daowei, et al. Control strategy of air conditioning load based on improved state-space model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 124-130.

[19] 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.

[20] 李德胜, 罗剑波. 特高压直流配套安全稳定控制系统的典型设计[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 151-157.  
LI Desheng, LUO Jianbo. Typical design of security and stability control system for UHVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 151-157.

[21] 赵丽莉, 王梦瑀, 倪明, 等. 安全稳定控制装置硬件系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 67-73.  
ZHAO Lili, WANG Mengxun, NI Ming, et al. Analysis of hardware system's reliability of security and stability control device[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 67-73.

[22] 李辰龙, 徐妍, 徐海波, 等. 基于蒙特卡洛的安稳装置可靠性分析[J]. 电气自动化, 2018, 40(5): 83-85.  
LI Chenlong, XU Yan, XU Haibo, et al. Reliability analysis on the security and stability control device based on the Monte Carlo method[J]. Automatic Control Systems & Equipments, 2018, 40(5): 83-85.

[23] AMIR H E, MAHMUD F F. Design and routine test optimization of modern protection systems with reliability and economic constraints[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1): 271-278.

[24] WANG Q, MARTINEZ-ANIDO C B, WU H, et al. Quantifying the economic and grid reliability impacts of improved wind power forecasting[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4): 1525-1537.

[25] 彭云豪, 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.

[26] LI X, ZHOU S, XU X, et al. The reliability analysis based on subsystems of (n,k)-star graph[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2016, 65(4): 1700-1709.

[27] 郑涛, 王方, 金乃正. 双重化继电保护系统确定最佳检修周期新方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(10): 67-75.  
ZHENG Tao, WANG Fang, JIN Naizheng. A novel algorithm of determining the optimal routine test interval of the dual-redundant relay protection system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(10): 67-75.

[28] 冯豆, 李生虎, 崔芳. 继电保护系统最优检修周期的优化算法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(21): 60-64, 69.  
FENG Dou, LI Shenghu, CUI Fang. Optimization algorithm for maintenance period of protection systems[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(21): 60-64, 69.

[29] 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.

[30] 丁茂生, 王钢, 贺文. 基于可靠性经济分析的继电保护最优检修间隔时间[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(25): 44-48.  
DING Maosheng, WANG Gang, HE Wen. The optimum routine maintenance interval of protection based on reliability economic analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(25): 44-48.

收稿日期: 2020-11-23; 修回日期: 2021-02-25

作者简介:

颜云松(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定控制; E-mail: yanyunsong@sgepri.sgcc.com.cn

孙宁(1980—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定控制; E-mail: sunning@sgepri.sgcc.com.cn

张楠(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划与可靠性、特高压直流输电技术。E-mail: 2018110352@mail.hfut.edu.cn

(编辑 葛艳娜)