

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210530

基于可靠性灵敏度的 UHVDC 系统预防性检修优化

李生虎^{1,2}, 赵慧洁^{1,2}, 周慧敏^{1,2}, 张奥博^{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: 对特高压直流(Ultra High-Voltage DC, UHVDC)输电系统元件进行预防性检修(Preventive Maintenance, PM), 可提高 UHVDC 可靠性, 其难度在于如何确定需要预检的元件、如何建立反映预检参数对可靠性指标影响的预防性检修模型。针对上述问题, 建立了 UHVDC 可靠性灵敏度模型, 以确定其薄弱元件。提出了计及潜在故障状态的元件预防性检修模型。根据容量分层等值状态空间, 提出了包含预检的 UHVDC 可靠性模型。提出了 UHVDC 可靠性对薄弱元件预检参数的优化算法。算例分析验证了所提预防性检修的可行性和优化算法对改善 UHVDC 可靠性的有效性。

关键词: 特高压直流(UHVDC); 预防性检修; 可靠性; 灵敏度; 优化

Reliability sensitivity-based optimization for a UHVDC transmission system with preventive maintenance

LI Shenghu^{1,2}, ZHAO Huijie^{1,2}, ZHOU Huimin^{1,2}, ZHANG Aobo^{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: Preventive maintenance (PM) to the components of an ultra high-voltage DC (UHVDC) transmission system may improve its reliability. The difficulty is how to determine the weak component needing PM, and how to derive the PM model showing the impact of a component's PM parameters on system reliability. This paper derives a reliability sensitivity model of the UHVDC to determine the vulnerable component. The PM model for the weak component with its potential failure state is proposed. The state space is hierarchically aggregated based on the capacity to propose the reliability model of the UHVDC with the PM. The optimization model of UHVDC reliability to the PM parameter of vulnerable components is proposed. The numerical results verify the feasibility of the proposed PM and the effectiveness on improving the reliability of the UHVDC.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877061).

Key words: ultra high-voltage direct current (UHVDC); preventive maintenance; reliability; sensitivity; optimization

0 引言

特高压直流(Ultra High-Voltage DC, UHVDC)用于大容量、远距离输电, 有助于促进大规模风电和光伏消纳^[1-2]。截至 2020 年, 我国已投运 UHVDC 工程 11 项, 在建工程 4 项^[3]。与高压直流相比, UHVDC 每端增加 2 个换流单元(Converter Unit, CU), 单元元件故障可能导致降额运行甚至停运, 影响电力输送和电网安全, 因此有必要提高其可靠性。

现有可靠性改善方法包括修改元件参数、增加备用元件^[4-5]和预防性检修^[6]。前两种方法目的明确

且针对性强, 能够有效减少故障损失, 但参数指标改善和元件备用对经济成本有较高需求^[7]。相比之下, 在实际故障前进行修复或替换的预防性检修^[8], 适用度更高、应用更为广泛。目前, 预防性检修可用于继电保护^[9-10]、发电机^[11]、架空线路^[12]和冷备用元件^[13]等, 对应用于 UHVDC 的相关研究较少。结合 UHVDC 运行特性和结构特点, 对其预防性检修研究的难点在于:

(1) 如何确定预检元件。对 UHVDC 站内元件检修, 受成本和规程限制。状态检修可以判断元件运行状态、确定预检元件^[14], 但需要监测数据^[15-16]。如能找到对 UHVDC 可靠性影响较大的元件, 在其故障前进行预防性检修^[17-18], 有可能改善 UHVDC

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877061)

可靠性。文献[19]建立交直流电网可靠性灵敏度的解析表达,以调节可靠性参数,但是站在电网角度,未考虑预防检修,也未提出可靠性参数优化算法。

(2) 如何建立元件的预检模型。现有元件两状态模型不适合描述预检状态的状态模型^[20-21]。若增加预检状态,缺乏其与其他状态间转移率数据。

(3) 如何将元件预检模型引入 UHVDC^[22-23]。这不仅导致状态数增加,还需要考虑预检元件与现有 UHVDC 状态空间如何衔接。

针对上述问题,本文建立 UHVDC 可靠性灵敏度模型,以确定其薄弱元件。引入潜在故障状态,提出元件预防性检修模型,推导含有预防性检修参数的元件可靠性参数。基于元件预检模型,采用分层等值算法,量化预检元件和系统可靠性间关系,提出包含预防性检修的 UHVDC 可靠性模型。通过调节预检周期,提出对等效停运时间(Equivalent Outage Hours, EOH)的优化算法。算例分析了元件预防性检修模型对系统可靠性的影响,验证了优化算法对改善 UHVDC 可靠性指标的有效性。

1 UHVDC 结构

UHVDC 包含换流站(Converter Station, CS)子系统和直流线路(DC Line, DCL)子系统,其结构如图 1 所示。其中,换流站由换流变压器(Converter Transformer, CT)、阀(Valve, V)、控制保护(Control and Protection, C&P)、交流滤波器(AC Filter, ACF)、平波电抗器(Smoothing Reactor, SmR)和直流滤波器(DC Filter, DCF)等元件组成。整流侧和逆变侧换流站的站内结构相同。

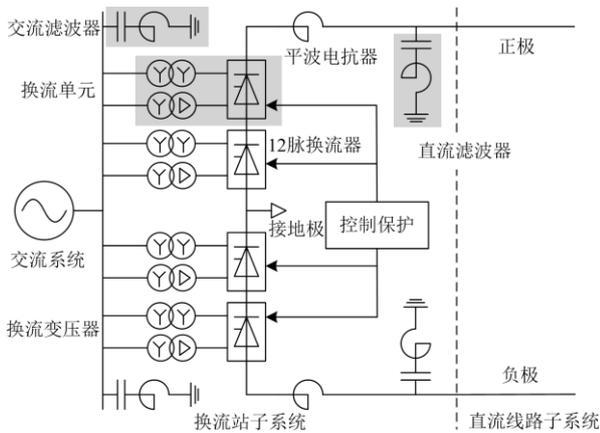


图 1 特高压直流系统结构图

Fig. 1 Configuration of UHVDC system

根据 UHVDC 结构和运行特性,将其运行方式和运行容量划分为双极运行(1 或 100%)、3/4 双极

运行(3/4 或 75%)、1/2 双极运行(2×1/4 或 2×25%)、单极运行(1/2 或 50%)、1/2 单极运行(1/4 或 25%)、双极停运(0)。

2 UHVDC 预检系统可靠性建模

2.1 引入潜在故障状态

元件故障可分为两种:直接故障和潜在故障。前者随机发生,日常检修对其改善效果不大。后者与元件老化、磨损有关,有可能通过预防性检修来改善。潜在故障主要由元件老化和运行磨损引起,处于潜在故障状态的元件在维持设备运行时更易故障停运。预防性检修能够修复或替换故障元件,有效阻止潜在故障元件的劣化。由于现有可靠性建模中,元件两状态模型不适合区分这两种故障类型,因此,在建立 UHVDC 预检模型前,绘制含有预防性检修参数的元件多状态模型(图 2)。

其中, λ 、 μ 和 γ 分别为元件的故障率、修复率和安装率,单位为次/年;下标 PM、HF 和 ZF 分别表示元件预检状态、检出的潜在故障状态和故障状态的转移率;下标 F 和 RT 分别表示状态等值后元件故障和预检状态的转移率。

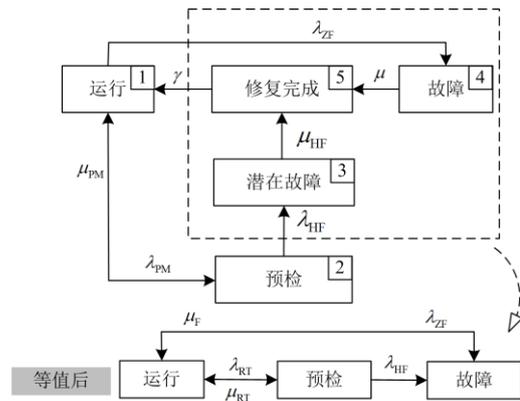


图 2 元件预检模型

Fig. 2 Preventive maintenance model of a component

由图 2 可知,转移率 λ_{ZF} 与预检和故障状态有关。无预检下,由于无法区分潜在故障和直接故障元件,元件故障停运后均通过纠正性检修恢复至运行状态。通过预检可以找到潜在故障元件,在其劣化停运前对其进行修复或替换。潜在故障和直接故障引起的停运可以用比例系数表示。由于潜在故障劣化情况受预防性检修周期 T 影响,故转移率 λ_{ZF} 为

$$\lambda_{ZF} = k\lambda + s(1-k)\lambda \quad (1)$$

式中: k 为直接故障系数,表示直接故障原因在故障中的占比; s 为影响系数,用于模拟元件的预防性检修效果, $s = 1/(1 + e^{-\alpha T + \beta})$, α 和 β 为常数。

元件预检率 $\lambda_{PM}=1/T$, λ 、 μ 、 γ 和 μ_{HF} 基于统计数据确定, 则经预检发现的故障转移率 λ_{HF} 和预检状态到状态 1 的转移率的 μ_{PM} 为

$$\lambda_{HF} = (1-s)(1-k)\lambda \quad (2)$$

$$\mu_{PM} = \lambda_{PM} - \lambda_{HF} \quad (3)$$

根据状态方程求解含预检的元件各状态概率为

$$\begin{cases} \mathbf{P}_c \mathbf{A}_c = \mathbf{0} \\ \sum p_i = 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{A}_c = [a_{ij}]$, 为含预检元件的状态转移矩阵, a_{ij} 为状态 i 到 j 的转移率; $\mathbf{P}_c = (p_1, \dots, p_3)$, 为含预检元件的状态概率。

利用频率和持续时间法(Frequency and Duration, F&D)对状态模型进行等值合并, 得到等值后的元件预检模型, 并计算等值后元件转移至故障状态和故障状态修复的转移率为

$$\lambda' = \frac{\lambda_{ZF} p_1 + \lambda_{HF} p_2}{p_1 + p_2} \quad (5)$$

$$\mu' = \gamma \frac{p_3}{1 - p_1 - p_2} \quad (6)$$

式中, λ' 、 μ' 为等值后元件转移率参数。至此, 提出了元件的预防检修模型, 推导了含有预检周期的元件可靠性参数。

2.2 含预检的 UHVDC 模型

为量化底层预检元件与系统可靠性指标间关系, 采用分层等值方法。通过状态组合和状态等值, 建立元件和子系统间关系, 进而分析元件计及预检后对 UHVDC 系统可靠性的影响。

2.2.1 换流单元子系统

对换流单元内部元件, 如换流桥(Converter

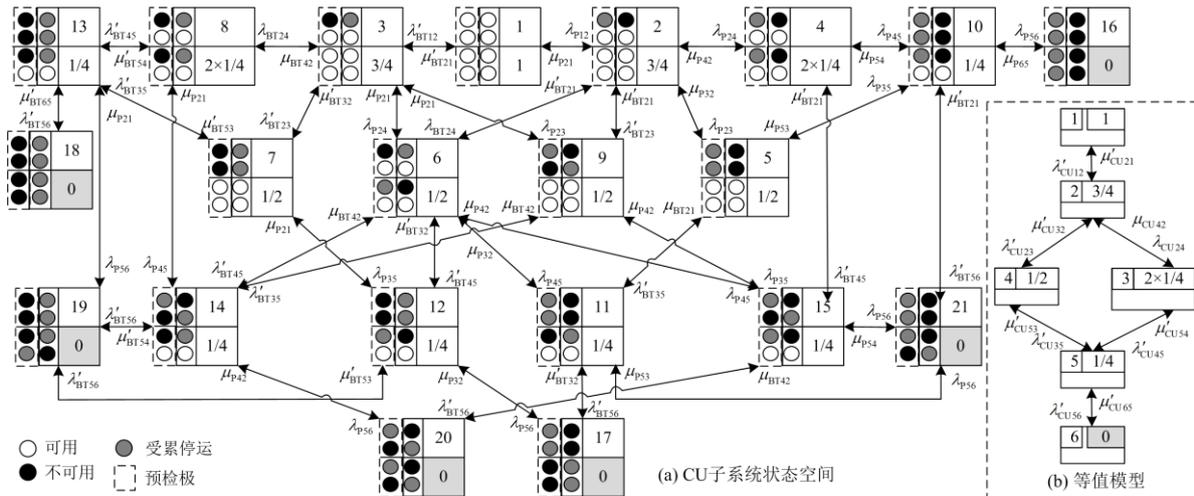
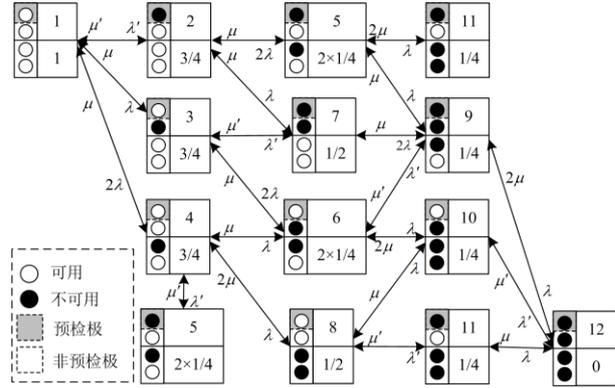


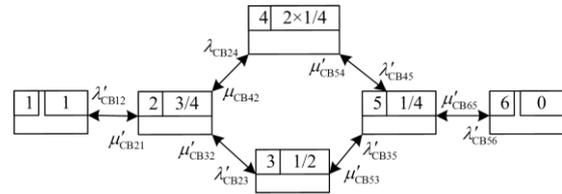
图 4 单侧换流单元预检状态模型

Fig. 4 State model of one-side converter unit with preventive maintenance

Bridge, CB)、CT 和 C&P, 图 3 建立元件子系统预检模型。为避免预检导致的两极停运, 考虑对 1/2 单极元件进行检修, 并区分预检极元件和非预检极元件的状态转移率参数。根据运行容量等级, 对元件子系统预检模型状态等值。



(a) 单侧元件子系统预检模型



(b) 单侧元件子系统等值模型

图 3 子系统预检模型

Fig. 3 Preventive maintenance model of subsystem

以对 CB 预防性检修为例, 图 4 建立单侧换流单元子系统预检模型, 其中预检元件 CB 状态变化引起的 CU 状态转移的转移率参数, 由 CB 的预检等值模型决定。

2.2.2 极子系统

极(Pole, PL)子系统由 ACF、SmR 和 DCF 等元件构成。由于正负两极各有一组极元件, 且两组元件不可互为备用, 因此对双侧换流站单极元件进行

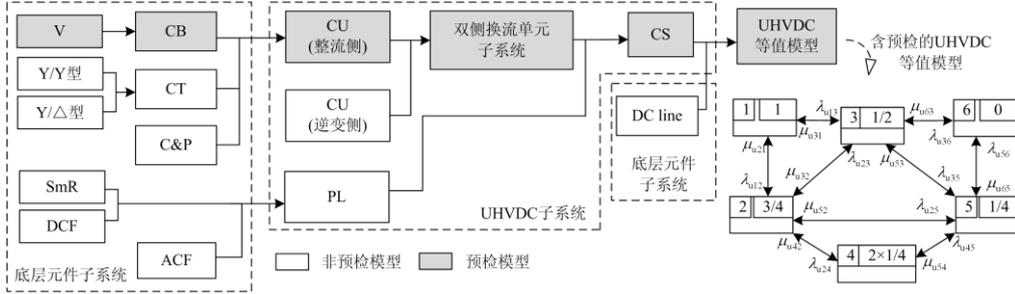


图5 含预检的 UHVDC 分层等值

Fig. 5 Hierarchical equivalent of UHVDC system with preventive maintenance

2.3 预检模型的状态等值

分层等值可以描述元件和系统间的状态关系, 但无法求解元件参数对系统可靠性的影响, 故引入 F&D 法求解等值前后状态参数间关系。

由于含预检周期的 UHVDC 状态多, 不易手动等值。为此, 在 F&D 法中引入等值矩阵 M ^[24], 以描述等值前后状态对应关系。设等值前后状态数分别为 n 和 m , 则等值前后各状态可靠性如下

$$P' = MP \quad (7)$$

$$A' = [M \text{diag}(P) M^T]^{-1} M \text{diag}(P) A M^T \quad (8)$$

式中: $P'_{n \times 1}$ 、 $P'_{m \times 1}$ 分别为等值前后的状态概率; $A_{n \times n}$ 、 $A'_{m \times m}$ 分别为等值前后转移率矩阵; M 是 $m \times n$ 阶常数矩阵。故图 2 元件预检模型的等值矩阵 M 为

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

通过 M , 建立元件到子系统再到 UHVDC 系统可靠性间的等式关系。计算分析 EOH、双极停运率 (Bipolar Unavailability, BU) 和双极可用率 (Bipolar Availability, BA), 选择 EOH 作为指标, 量化 UHVDC 的可靠性为

$$EOH = 8760 \times \left(\frac{1}{4} P_2 + \frac{1}{2} P_3 + \frac{1}{2} P_4 + \frac{3}{4} P_5 + P_6 \right) \quad (10)$$

式中, $P_u = (P_1, \dots, P_i, \dots, P_6)^T$, 为含预检的 UHVDC 系统状态概率。

3 UHVDC 预检系统的可靠性优化

利用分层等值和 F&D 法求解元件参数与系统可靠性间等式关系。为进一步量化元件参数对可靠

预防性检修, 经等值后建立 PL 子系统模型。

经各子系统合并等值, 可得到 UHVDC 预检模型。分层等值过程及 UHVDC 预检模型如图 5 所示。

性的影响, 对元件参数灵敏度分析。由 $P = D^{-1}B$ 得

$$\frac{\partial P}{\partial z_{DC}} = \frac{\partial (D^{-1}B)}{\partial z_{DC}} = -D^{-1} \frac{\partial D}{\partial z_{DC}} D^{-1}B \quad (11)$$

式中: D 为 A 的转置, 且最后一行元素置 0; z_{DC} 为元件可靠性参数; B 为最后一行元素为 1 其余元素为 0 的列向量。等值后 A' 对 z_{DC} 的灵敏度为

$$\begin{aligned} \frac{\partial A'}{\partial z_{DC}} &= \frac{\partial [\text{diag}^{-1}(P') M \text{diag}(P) A M^T]}{\partial z_{DC}} = \\ &= \text{diag}^{-1}(P') M \frac{\partial [\text{diag}(P)]}{\partial z_{DC}} M^T + \\ &= \text{diag}^{-1}(P') M \frac{\partial A}{\partial z_{DC}} M^T - \\ &= \text{diag}^{-1}(P') \frac{\partial P'}{\partial z_{DC}} \text{diag}^{-1}(P') M \text{diag}(P) A M^T \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $\text{diag}(P') = M \text{diag}(P) M^T$ 。

联立式(7)、式(11)和式(12), 得到等值后 P' 对 z_{DC} 的灵敏度, 进而计算 UHVDC 系统可靠性指标对 z_{DC} 的灵敏度, 如式(13)一式(15)所示。其中 $P_{du} = (P_{d1}, \dots, P_{d5}, \dots, P_{d6})^T$, 是不含预检的 UHVDC 状态概率。

$$\frac{\partial EOH}{\partial z_{DC}} = 8760 \times \left(\frac{1}{4} \frac{\partial P_{d2}}{\partial z_{DC}} + \frac{1}{2} \frac{\partial P_{d3}}{\partial z_{DC}} + \frac{1}{2} \frac{\partial P_{d4}}{\partial z_{DC}} + \frac{3}{4} \frac{\partial P_{d5}}{\partial z_{DC}} + \frac{\partial P_{d6}}{\partial z_{DC}} \right) \quad (13)$$

$$\frac{\partial BO}{\partial z_{DC}} = \frac{\partial P_{d6}}{\partial z_{DC}} \quad (14)$$

$$\frac{\partial BA}{\partial z_{DC}} = \frac{\partial P_{d1}}{\partial z_{DC}} + \frac{\partial P_{d2}}{\partial z_{DC}} + \frac{\partial P_{d4}}{\partial z_{DC}} \quad (15)$$

分析元件参数对系统可靠性指标的影响情况, 选择用于预检的薄弱元件, 根据第 2 节建立其预检模型和含预检的 UHVDC 可靠性模型, 并进一步考虑检修周期的优化。以薄弱元件预防性检修周期为变量, 优化含预检的 UHVDC 系统可靠性为

$$\min f(T) = EOH \quad (16)$$

含预检元件层级参数 P_c 和 A_c 、子系统层级参数以及 UHVDC 状态概率 P_u 均满足等式约束式(4)、式(7)和式(8)。取预防性检修周期上下限为 T_{\max} 、 T_{\min} , 不等式约束为

$$T_{\min} < T < T_{\max} \quad (17)$$

考虑单元件预防性检修费用为 C_1 , 停电损失费用为 C_2 , 则最优预检周期 T_0 下, 成本 C 为

$$C = \frac{8760C_1}{T_0} + C_2EOH \quad (18)$$

从算法适用性角度, 对上述研究给出如下说明:

(1) 换流站内设备检修周期需要满足相关管理规程。本文算法是针对薄弱元件的预防检修。非薄弱元件的最优预防检修周期往往长于规程确定的定期检修周期, 因此可以沿用后者。

(2) 不同电压等级的 UHVDC 换流站, 站内配置大致相同, 因此本文算法同样适用。无论电压等级相同与否, 特高压直流线路的元件参数、故障率、定期检修周期上下限都可能存在差异。应用本文算法时, 只需修改上述参数, 无需修改算法模型。

4 算例分析

4.1 确定薄弱元件

UHVDC 各元件故障率、修复率和安装率参考 ±800 kV UHVDC 线路, 如表 1 所示^[24]。首先对不含预检的 UHVDC 系统进行建模, 分析系统薄弱元件, 再根据所确定的薄弱元件, 建立元件和 UHVDC 的预检模型。

表 1 UHVDC 元件参数

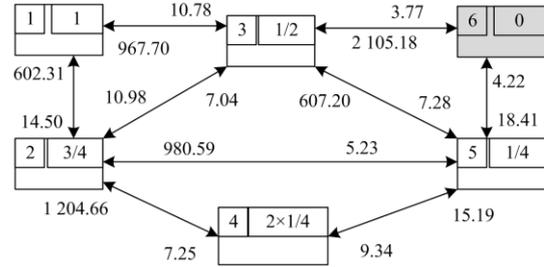
Table 1 Components' parameters of UHVDC

元件	故障率/ (次/年)	修复率/ (次/年)	安装率/ (时/次)
V	0.137 4	1 460.00	6
CT	0.012 6	290.500 8	48
C&P	0.088	1 158.12	—
ACF	0.060 7	1 212.2	—
DCF	0.25	730.00	—
SmR	0.03	133.536 6	—
DCL	4.708 0	1 101.890	—

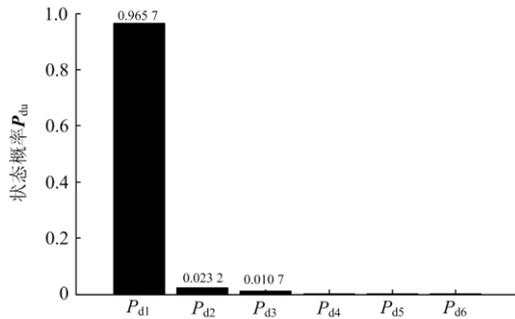
根据各元件参数求解不含预检下 UHVDC 系统等值模型的可靠性参数 A_{du} 、 P_{du} 以及系统可靠性指

标对 z_{DC} 的灵敏度。

图 6 给出 UHVDC 状态转移率参数和状态概率。UHVDC 在部分元件故障下仍可降额运行, 但系统处于严重故障(状态 5 和 6)的概率远低于其他运行状态概率, 且系统基本处于双极运行。



(a) UHVDC 转移率参数

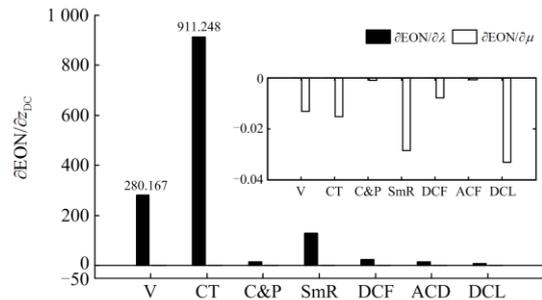


(b) UHVDC 6 状态概率

图 6 不含预检的 UHVDC 可靠性参数

Fig. 6 UHVDC system indices without preventive maintenance

图 7 给出可靠性指标对可靠性参数的灵敏度。元件故障率对系统可靠性指标的影响远大于修复率, 且其对 EOH 的影响远大于 BU 和 BA。因此, 选择 EOH 作为指标更易判断预检对系统可靠性的影响, 用于确定最优预防性检修周期。换流变压器和换流桥内阀的故障率对 EOH 的影响远大于其余元件, 故选取阀和换流变压器作为预检元件, 分别建立对两者加入预防性检修的 UHVDC 可靠性模型并优化两者的预防性检修周期。



(a) EOH 对 λ 、 μ 的灵敏度

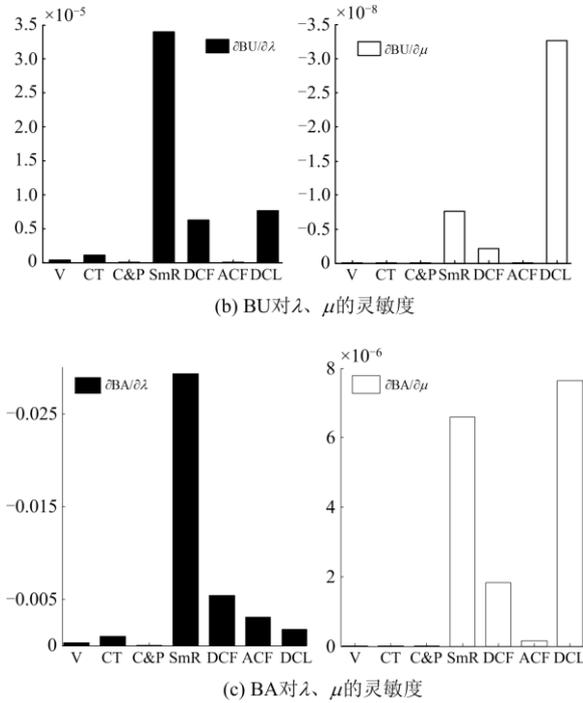


图 7 可靠性指标对 λ 、 μ 的灵敏度

Fig. 7 Sensitivity of reliability indices to λ and μ

4.2 优化预检周期

分别对阀和换流变压器考虑预检的 UHVDC 优化模型进行计算。设定影响系数 s 的参数 $\alpha = 1.25 \times 10^{-3}$, $\beta = 4.38$, $k = 0.2$, $\mu_{HF} = 3\mu$, $T_{min} = 10$ h, $T_{max} = 10^4$ h。

在 $T \in [1, 2 \times 10^4]$ h 内, 随着 T 增大, 分别对换流变压器和阀预检的 UHVDC 系统, 其 EOH 先减小后增大, 最后分别趋近于 94.73 h 和 93.92 h, 如图 8 所示。对于阀, 当 $T = 2\ 635$ h 时, $f = 93.278$ h, 对于换流变压器, 当 $T = 4\ 020$ h 时, $f = 92.520$ h。

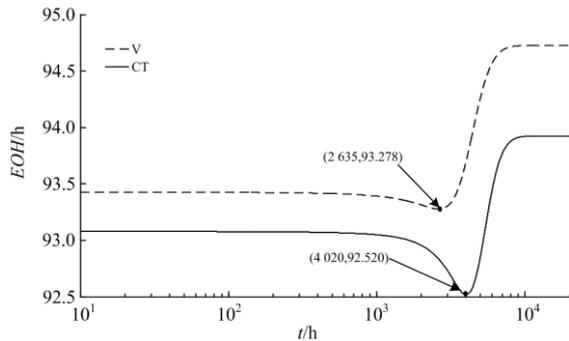


图 8 不同预检周期下的等效停运时间

Fig. 8 EOH with the preventive maintenance

图 9 和表 2 对比了优化前后系统状态概率。在最优预检周期 T_0 下元件和系统可靠性得到改善。相

比单极运行和 1/2 极运行, 预检对 3/4 双极运行的状态概率改善效果较好。由于各类型元件故障均可能导致 UHVDC 双极劣化停运, 故预检对双极停运的改善效果弱于其他运行方式。

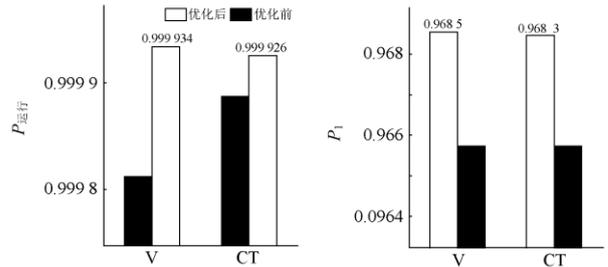


图 9 T_0 对状态概率的影响

Fig. 9 Effect of T_0 to the state probability

表 2 优化后 UHVDC 系统状态概率

Table 2 State probability of UHVDC after optimization

运行方式	系统状态概率		
	无预检	对 V 预检	对 CT 预检
3/4 双极运行	0.023 2	0.021 0	0.022 5
单极运行	0.010 7	0.010 8	0.011 0
1/2 双极运行	1.387×10^{-4}	6.328×10^{-5}	1.271×10^{-4}
1/2 单极运行	1.363×10^{-4}	1.123×10^{-4}	1.227×10^{-4}
双极停运	1.942×10^{-5}	1.940×10^{-5}	1.941×10^{-5}

对于阀和换流变压器, 当预检周期未达到最优值时, 周期越短, 预检越频繁, 越不利于系统正常运行。由于无故障元件预检过程耗时短, 预检后可直接投入运行, 故 EOH 小于无预检情况; 预检周期过长会弱化元件的预检效果, 对 EOH 改善不明显, 因此在 T 趋近 10^4 h 时等效停运时间趋于稳定且仍小于正常状态下的指标。

4.3 系统可靠性改善效果

元件的经济损失数据设置如表 3 所示。对比分析预防性检修前后, 系统可靠性的改善情况和检修经济损失, 结果如表 4 所示。

相比于无检修状态, 对阀和换流变预检使得 EOH 降低, BA 增加, BU 减少, C 减少, UHVDC 系统的可靠性得到改善, 停电损失降低。不同元件预检的效果可能与元件故障影响程度和元件数量有关。一组换流单元内含有一组换流变和一组 12 脉换流器, 相比于对一组换流变预检, 对一组换流器需

表 3 元件经济损失数据

Table 3 Economic loss of components

元件	C_1 (万元/次)	C_2 (万元/次)
V	0.18	2.00
CT	0.5	2.00

表 4 预检前后系统指标对比

Table 4 System indices before and after preventive maintenance

可靠性指标	无预检	对 V 预检	对 CT 预检
EOH/h	99.674	93.278	92.520
BA	0.989 1	0.989 6	0.990 9
BU	1.9411×10^{-5}	1.9404×10^{-5}	1.9409×10^{-4}
C/万元	199.284	187.154	186.130

预检 12 个阀,且任一个阀故障均可能导致换流器故障停运。因此,预检换流变更更有利于保持系统正常运行、减少停电损失,而预检阀更有利于减少系统发生严重故障的概率。

5 结论

本文基于分层等值和灵敏度分析,确定 UHVDC 需要预防性检修的薄弱元件。提出计及薄弱元件潜在故障的 UHVDC 预检模型。以 EOH 为目标,优化薄弱元件预检周期,得到以下结论:

(1) 系统可靠性指标对元件故障率灵敏度远高于对其修复率。与双极可用率和双极停运率相比,EOH 更受元件故障率影响,特别是阀和换流变故障率,因为同一换流单元内阀或换流变压器故障可能导致换流桥或其他元件受累停运,从而更易影响 UHVDC 运行。

(2) 阀和换流变的故障率与 EOH 负相关,因此分别对其进行优化以提高 UHVDC 可靠性。结果验证了预防性检修的有效性。对换流变预检更有利于维持 UHVDC 运行,对阀预检更有利于减少 UHVDC 严重故障发生概率。

参考文献

- [1] 刘泽洪. ± 1100 kV 特高压直流输电工程创新实践[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7782-7792.
LIU Zehong. Findings in development of ± 1100 kV UHVDC transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7782-7792.
- [2] 廖长风, 李勇, 马俊杰. 考虑直流系统双极闭锁故障的受端电网运行成本优化[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 79-86.
LIAO Changfeng, LI Yong, MA Junjie. Operating cost optimization of the receiving side power system considering the bipolar blocking fault of the DC system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 79-86.
- [3] WU D, ZHANG N, KANG C, et al. Techno-economic analysis of contingency reserve allocation scheme for combined UHV DC and AC receiving-end power system[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2016, 2(2): 62-70.
- [4] HAMOUD G A, YIU C. Assessment of spare parts for system components using a Markov model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 3114-3121.
- [5] HAMOUD G A, YIU C. One Markov model for spare analysis of distribution power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1643-1648.
- [6] MAHDAVI M, MONSEF H, ROMERO R. Reliability effects of maintenance on TNEP considering preventive and corrective repairs[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3768-3781.
- [7] 俞晨玺, 孔维禄, 俞柏红, 等. 考虑需求响应的多目标机组检修调度优化[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 110-118.
YU Chenxi, KONG Weilu, YU Bohong, et al. Multi-objective optimization of generation maintenance scheduling considering demand response[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 110-118.
- [8] 邓奥攀, 胡志坚, 胡美玉, 等. 同时计及设备老化与不完全维修的电力系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 69-74.
DENG Aopan, HU Zhijian, HU Meiyu, et al. Power system reliability evaluation considering deterioration and imperfect maintenance of equipment[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 69-74.
- [9] 王玉财, 吕飞鹏, 何奎. 满足可靠性要求的继电保护装置预防检修模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 49-53.
WANG Yucai, LÜ Feipeng, HE Kui. Preventive maintenance model for relay protection device based on reliability requirements[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 49-53.
- [10] 薛安成, 刘中硕, 刘一民, 等. 基于改进役龄模型和全生命周期成本的继电保护装置服役年限确定[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(03): 219-224.
XUE Ancheng, LIU Zhongshuo, LIU Yimin, et al. Determination of service life for relay protection device based on improved age-reduction model and life cycle cost[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(03): 219-224.
- [11] SADEGHIAN O, SHOTORBANI A M, MOHAMMADI-IVATLOO B. Generation maintenance scheduling in virtual power plants[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2019, 13(12): 2584-2596.

- [12] ZHANG D, LI W, XIONG X. Overhead line preventive maintenance strategy based on condition monitoring and system reliability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1839-1846.
- [13] MENDES A A, RIBEIRO J L D, COIT D W. Optimal time interval between periodic inspections for a two-component cold standby multistate system[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2017, 66(2): 559-574.
- [14] 彭熹, 王佳文, 李振文, 等. 基于犹豫模糊矩阵的变电站自动化设备检修优先级决策[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 104-109.
- PENG Xi, WANG Jiawen, LI Zhenwen, et al. Substation automation equipment maintenance priority decision based on hesitation fuzzy matrix[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 104-109.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] HE J, GUAN X. Uncertainty sensitivity analysis for reliability problems with parametric distributions[J]. IEEE Transaction on Reliability, 2017, 66(3): 712-721.
- [18] 魏霖, 童宁, 林湘宁, 等. 面向多端直流电网的高可靠性允许式纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(增刊 1): 95-108.
- WEI Lin, TONG Ning, LIN Xiangning, et al. VSC-MTDC oriented high reliable permissive pilot protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(S1): 95-108.
- [19] WU Z, LI S, ZHANG H, et al. Sensitivity-based optimal reliability design of AC/UHVDC systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(3): 356-367.
- [20] 马光, 张伊宁, 陈哲, 等. 含大规模风电的交直流混联系统风险评估方法[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3241-3252.
- MA Guang, ZHANG Yining, CHEN Zhe, et al. Risk assessment method for hybrid AC/DC system with large-scale wind power integration[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3241-3252.
- [21] 叶远波, 刘宏君, 黄太贵, 等. 变电站继电保护设备状态检修可靠性分析方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 170-177.
- YE Yuanbo, LIU Hongjun, HUANG Taigui, et al. Research on the reliability analysis method of condition-based maintenance of relay protection equipment in substation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 170-177.
- [22] 郟朝辉, 李威, 崔晓丹, 等. 基于分层马尔可夫的可修复稳定控制系统可靠性分析[J]. 中国电力, 2020, 53(3): 101-109.
- QIE Zhaohui, LI Wei, CUI Xiaodan, et al. Reliability analysis of repairable stability control system based on hierarchical Markov[J]. Electric Power, 2020, 53(3): 101-109.
- [23] 薛安成, 罗麟, 景琦, 等. 继电保护装置的多因素时变 Markov 模型及其检修策略分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 124-129.
- XUE Ancheng, LUO Lin, JING Qi, et al. Research on the maintenance strategies of protective relay based on time-varying Markov model including multi-factors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 124-129.
- [24] 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.

收稿日期: 2021-05-08; 修回日期: 2021-11-11

作者简介:

李生虎(1974—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博导, 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、高压直流和柔性交流输电; E-mail: shenghuli@hfut.edu.cn

赵慧洁(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统可靠性分析、特高压直流输电技术; E-mail: 2019110347@mail.hfut.edu.cn

周慧敏(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为交直流电网安全稳定控制系统可靠性分析和优化。E-mail: 2020110380@mail.hfut.edu.cn

(编辑 张爱琴)