

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201324

基于安全风险概率的双特高压直流馈入网架关键断面通道 检修评估方法研究

刘轶¹, 张毅明¹, 高昆², 谢岩³, 吴昊天³, 潘雪晴²

(1. 国网河南省电力公司调控中心, 河南 郑州 450052; 2. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450002; 3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 双特高压直流(Ultra High Voltage Direct Current, UHVDC)馈入同一网架, 通道间存在强耦合性。合理制定受电端关键断面通道检修方案及评估方法, 对于防御 UHVDC 受端交流系统失稳引发大面积停电事故至关重要。针对此问题, 提出一种基于安全风险概率的 UHVDC 馈入网架关键断面通道检修评估方法。首先, 在分析受端网架强度评估指标基础上提出基于多馈入短路比的网架强度评估方法, 以短路比对网架结构耦合强度进行评估。然后, 根据网架评估结果并综合考虑关键断面通道检修安全影响因素, 提出高压直流馈入网架关键断面检修的安全风险量化评估方法, 构建安全风险模糊评价模型, 以各指标变化率对直流通道的关键断面检修时整个网架运行可靠性进行量化评估。最后, 以某省电网双馈入“青豫直流”及“天中直流”所构成的网架及实际案例仿真评估, 验证所提出检修评估方法的有效性, 识别出部分危险检修方式以引起生产部门重视并在实际操作中予以禁止。

关键词: 双特高压直流; 网架强度评估; 通道检修; 安全风险概率; 模糊评价模型

Research on a maintenance evaluation method of the key section channel of a double UHVDC feed in a grid based on safety risk probability

LIU Yi¹, ZHANG Yiming¹, GAO Kun², XIE Yan³, WU Haotian³, PAN Xueqing²

(1. State Grid Henan Electric Power Company Dispatching & Controlling Center, Zhengzhou 450052, China;

2. State Grid Henan Electric Power Company Research Institute, Zhengzhou 450002, China;

3. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: A dual UHVDC is fed into the same grid, and there is strong coupling between the channels. It is necessary to develop a suitable maintenance evaluation method for the key section of the power receiving terminal. In order to do this, a maintenance evaluation method based on safety risk probability for the key section channel of double UHVDC feed in a grid is proposed. First, a grid strength evaluation method is established based on the analysis of the strength evaluation index of the grid receiving terminal. The coupling strength of the grid structure is evaluated by short circuit ratio. From the results of the evaluation and considering the safety factors of critical section channel maintenance, a quantitative assessment method of safety risk for UHVDC critical section maintenance is proposed. A fuzzy evaluation model of safety risk is constructed, and the reliability of the whole grid during the maintenance of the key section of UHVDC channel is evaluated quantitatively according to the change rate of each index. Finally, simulation and evaluation are carried out on the grid structure composed of Qing-Yu UHVDC and Tian-Zhong UHVDC in a provincial power grid, and the effectiveness of the proposed maintenance evaluation method is verified. Dangerous maintenance scenarios are identified by the proposed method and have gained the attention of the grid operation department and are forbidden in actual operation.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0905200) and the Project of State Grid Henan Electric Power Company (No. 52170219000M).

Key words: double UHVDC; grid strength evaluation; channel maintenance; probability of safety risk; fuzzy evaluation model

0 引言

由于 UHVDC 具有输电容量大、距离远、区域

互联性能良好的技术优势, 已成为我国“西电东送”及区域电网互联的主要通道和连接方式^[1-2]。然而, 随着我国 UHVDC 建设快速发展, 受电端电网呈现多直流集中馈入格局^[3]。交流受电端同直流端及不同直流端的交互耦合使电网运行、调度复杂程度增加。由于各交直流通道间相互耦合, 直流通道的运

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFB0905200);
国网河南省电力公司项目资助(52170219000M)

行状态直接关系到交流受电端的供电可靠性^[4-5]。因此,电力部门在制定受电端检修维护计划时,仅从单一的直流设备状态来评估系统故障对电网可靠性的影响,但却忽略 UHVDC 馈入网架关键断面通道上线路检修对电网及输电通道稳定性的影响。

同时,更重要的,实际电网在全季节运行中往往除夏冬季负荷高峰期之外,全年超过 80%的时间因检修停运而呈现出非全接线运行方式,如何建立多时间尺度(月度、周度、日前、小时前)快速高效的双馈入、多馈入直流功率形态下的运行方式计划安排与评估成为了国内外电力系统运行与控制方面关注的核心问题之一。

因此,需要量化评估关键断面通道停运检修时直流馈入电网的安全风险,以确定合理的检修计划。

电力系统各类元件检修一直是国内外学者研究的热点之一^[6-9],对多馈入高压直流馈入网架关键断面通道进行检修计划制定时,首先需要考虑不同直流通道间的相互耦合影响。耦合程度越低的断面通道越有利于制定开展安全风险评估和检修计划,同时其检修对高压直流通道及电网运行稳定性影响也越小^[10-11]。因此,在开展直流馈入网架断面通道安全风险评估和检修计划时,需要对受段网架强度进行评估。而目前判定交流系统强弱的有效参数指标主要是短路比及多馈入短路比。文献[12]主要对多馈入系统短路比的影响因素进行分析,将其对短路比的影响量化处理;文献[13]则是采用系统阻抗矩阵支路追加法来分析系统网架参数变化对短路比的影响。上述文献并没有考虑分层直流馈入交流电网的网架结构评估。因此,在此分析基础上引入分层直流短路比和多馈入短路比共同评估网架结构强度。

在对双特高压直流馈入网架关键断面通道检修评估时主要分为事前评估和事后评价两类^[14]。事前评估主要是从预测状态出发,文献[15]从主要直流馈入网架关键断面各线路的健康度指标出发对直流通道上元件可靠性水平进行评估,文献[16]则通过对断面各输电通道进行可靠性分摊,根据各分摊比例对通道可靠性进行评估。而事后评估主要对历年可靠性指标进行分析,如文献[17]研究历年通道断面检修评估指标,参考历年评估指标规律变化来制定检修计划。但上述文献无论是事前检修还是事后检修都没有以风险量化的方式对网架关键断面通道检修结果进行评估。

因此,针对上述问题,提出一种基于安全风险

概率的双特高压直流馈入网架关键断面通道检修评估方法。在分析并建立交流受端网架强度评估方法基础上,根据网架评估结果并综合考虑关键断面通道检修风险因数后,提出高压直流馈入网架关键断面检修的安全风险量化评估方法,对直流通道关键断面检修时整个网架运行可靠性进行量化评估。最后,以“青豫直流”及“天中直流”直流双馈入网架验证对本文所提出的检修评估方法的有效性。

1 受端交流网架强度评估指标

直流馈入交流受电端过程中,受端电网强度评估指标主要包括短路比(Short Circuit Ratio, SCR)、多馈入短路比(Multi-infeed Short Circuit Ratio, MSCR)及分层直流短路比(Hierarchical Connection DC Short Circuit Ratio, HSCR)等。

对于单一直流通道馈入交流受端网架结构,SCR 是最简单且有效的判断交流系统网架强弱的指标。其被表达为

$$SCR_i = \frac{S_{aci}}{P_d} = \frac{U_i^2 / Z_{aci}}{P_{di}} \quad (1)$$

式中: S_{aci} 为直流通道*i*馈入交流端的三相短路容量,kVA; P_{di} 为直流通道*i*输送容量,kW; U_i 为换流母线*i*电压,V; Z_{aci} 为交流系统等效阻抗, Ω 。

对多直流馈入网架强度进行评估,采用 MSCR 指标表征直流通道间的相互影响^[18-21],可以表示为

$$MSCR_i = \frac{S_{aci}}{\sum_{k=1}^n P_{dk} MIIF_{ki}} \quad (2)$$

式中: P_{dk} 为直流通道*k*所传输的容量/kW; $MIIF_{ki}$ 为直流通道*k*对直流通道*i*的影响,可由通道间换流母线的电压变化或者线路阻抗表征,具体如式(3)。

$$MIIF_{ik} = \frac{\Delta U_k}{\Delta U_i} = \frac{|Z_{ik}|}{|Z_{ii}|} \quad (3)$$

式中: ΔU_i 、 ΔU_k 分别为换流母线*i*、*k*的电压变化,V; Z_{ii} 、 Z_{ik} 分别表示母线*i*自阻抗和互阻抗, Ω 。

式(3)只表征一条直流通道对另一直流通道的影响,并不能体现两通道间的耦合关系。因此,为了表征两直流通道间耦合关系及交互影响,采用直流耦合指数 η 来确定两通道耦合强度^[22]。

$$\eta_{ij} = \sqrt{MIIF_{ij}^2 + MIIF_{ji}^2} \quad (4)$$

在直流通道分层接入情况下,通过 HSCR 指标判定分层直流间以及其他直流间的相互影响,将分层直流通道分别记为*i*、*j*,则其 HSCR 指标可被表示为

$$HSCR_i = \frac{S_{aci}}{P_{di} + \sum_{k=1, k \neq i}^n \left| \frac{Z_{ik}}{Z_{ii}} \right| P_{dk} + \left| \frac{Z_{ij}}{Z_{jj}} \right| P_{dj}} \quad (5)$$

式中: S_{aci} 为分层直流通道的交流三相短路容量, kVA; P_{di} 为分层直流端 i 、 j 及其他直流端 k 的功率, kW; Z_{ik} 、 Z_{ij} 、 Z_{ii} 、 Z_{jj} 分别为阻抗矩阵对应的元素, Ω 。

不同数量、形式直流通道馈入后的受端网架具有不同的网架强度评估指标, 将网架结构强度分为强系统、弱系统及极弱系统三种, 不同网架结构强度所对应的评估指标值如表 1 所示。根据直流通道的接入类型及通道参数计算评估指标值, 并对照表 1 参数即可得到直流通道的强度和通道间的耦合强度关系。

表 1 受端网架结构强度评估指标值

Table 1 Strength evaluation index value of grid structure at receiving terminal

项目	SCR	MSCR	HSCR
强系统	>5	>3	>3
弱系统	3~5	2~3	2~3
极弱系统	<3	<2	<2

2 考虑综合因素模糊评判的关键断面通道安全风险

2.1 安全风险模糊评价模型

在双特高压直流馈入网架的关键断面通道检修时, 考虑受端交流网架强度评估影响因素较多, 并且影响因素相互关联, 因此本文采用考虑综合因素模糊评判的方法对关键断面通道安全风险进行评估。

对式(4)、式(5)中的影响因素, 如电压波动、功率缺额进行集合化处理, 集合为 $\mathbf{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_z\}$, 对应的安全风险参数为 $\mathbf{B} = \{b_1, b_2, \dots, b_l\}$, 建立综合因素模糊评价矩阵为

$$\mathcal{C} = (a_{zl})_{z \times l} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1l} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2l} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{z1} & a_{z2} & \dots & a_{zl} \end{bmatrix} \quad (6)$$

由于每个因素对网架关键断面通道存在的安全风险影响的等级存在差异性, 因此在考虑安全风险评估过程中设置不同等级的模糊权重参数向量 $\tilde{\mathbf{D}} = \{d_1, d_2, \dots, d_z\}$, 建立模糊隶属关系对应的安全风险评估量化向量集为

$$\mathcal{B} \rightarrow \mathcal{C} \times \tilde{\mathcal{D}} \quad (7)$$

2.2 安全风险影响因素分析

在考虑关键断面通道检修时, 需要进行综合因素评判, 要考虑的安全风险因素主要包括系统发生

过载的概率指标、负荷的损失量及负荷损失发生的概率。

当考虑系统发生过载的概率指标时, 选取安全风险状态集合为 S , 在运行方式 φ 下建立状态安全风险 k 对应的过载概率为

$$f_{S_l}(\varphi) = \frac{\sum_{k \in S_l} I_k(e, \varphi)}{N_l} \quad (8)$$

式中: N_l 为第 l 类安全风险发生的个数; $I_k(e, \varphi)$ 为系统所处状态的表征量, $I_k(e, \varphi) \in \{0, 1\}$, 具体取值与式(6)、式(7)相对应。

当考虑系统负荷的损失量时, 在运行方式 φ 下建立状态安全风险 k 对应的负荷损失表达式为

$$f_F(\varphi) = \sum_{k \in S} L_k(\varphi) I_k(h, \varphi) \quad (9)$$

式中, $I_k(h, \varphi)$ 为系统负荷损失的表征量。

当考虑系统负荷的消减量及对应负荷消减发生的概率时, 在运行方式 φ 下建立状态安全风险 k 对应的负荷消减发生的概率为

$$f_k(\varphi) = \prod_{z=1}^{Z_f} f_z'(\varphi) \prod_{z=1}^{Z-Z_f} f_z''(\varphi) \quad (10)$$

式中: Z_f 为系统在状态安全风险 k 下不引发故障的影响因素个数; $f_z'(\varphi)$ 为断面通道可用的概率; $f_z''(\varphi)$ 为断面通道失效概率。

选取安全风险状态集合 S , 考虑不同安全风险组合情况下负荷损失发生的概率为

$$P_{S_l}(\varphi) = \sum_{k \in S_l} P_k(\varphi) I_k(h, \varphi) \quad (11)$$

式中, $I_k(h, \varphi) \in \{0, 1\}$, 具体取值与式(6)、式(7)相对应。

3 基于安全风险概率的关键断面通道检修评估方法

3.1 安全风险模糊评价模型

根据上节模糊隶属关系对应的 $N-1$ 安全风险评估量化向量集, 得出关键断面通道的安全风险指标 M_{FRI} , 具体为

$$M_{\text{FRI}} = x_z \cdot \mathcal{B}^T \quad (12)$$

式中, x_z 为模糊评价的向量数, 与式(6)相对应, 根据考虑影响因素的个数确定其取值。

为了更准确地确定影响因素与 $N-1$ 安全风险等级的对应关系, 本文改进了原有的 Δ 型隶属度函数结果, 将发生过载的概率指标、负荷的损失量及负荷损失发生的概率进行了模糊变换, 得到优化后的 Δ 型隶属度函数, 具体如图 1 所示。

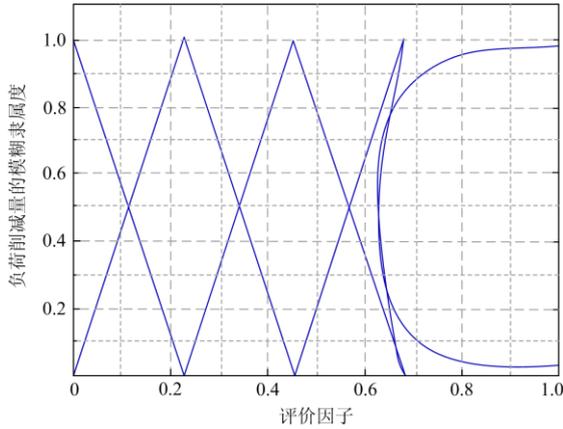


图 1 优化后 Δ 型隶属度函数
Fig. 1 Δ type membership function after optimization

根据建立的模糊隶属度函数及 $N-1$ 安全风险指标 M_{FRI} 确定安全风险评估的等级, 具体如表 2 所示。

表 2 风险评定标准

Table 2 Risk assessment criteria

风险指标	$M_{FRI} < 1.0$	$1.0 \leq M_{FRI} < 2.0$	$2.0 \leq M_{FRI} < 3.0$
评估结果	非常低	低	中
风险指标	$3.0 \leq M_{FRI} < 4.0$	$M_{FRI} \geq 4.0$	/
评估结果	高	非常高	/

除了考虑安全风险指标 M_{FRI} 外, 在对双特高压直流馈入网架的关键断面通道检修进行评估时, 最重要的指标是考虑电网运行的可靠率, 降低直流停运的风险, 考虑安全风险对应的贡献率指标 M_{FCI} 为

$$M_{FCI_z} = \frac{M_{FRI_{z'}} - M_{FRI_{z'}}}{M_{FRI_{z'}}} 100\% \quad (13)$$

式中: M_{FCI_z} 为模糊评价的向量数; $M_{FRI_{z'}}$ 与 $M_{FRI_{z'}}$ 为不同工况下对应的安全风险指标。

根据安全风险对应的贡献率指标 M_{FCI} 对关键断面通道进行检修评估, 将关键断面通道进行状态等级划分, 将安全风险指数为 g 的设备需检修的概率定义为如下区间, 具体如表 3 所示^[23]。

表 3 设备状态与需检修状态区间的关系

Table 3 Relationship between equipment status and maintenance probability interval

设备状态	正常	注意	异常	严重
需检修状态区间	0~0.25	0.25~0.5	0.5~0.75	0.75~1

建立安全风险概率与需检修状态区间的指数函数关系为

$$\kappa(g) = \alpha_z e^{\beta_z g} + \chi_z \quad (14)$$

式中, α_z 、 β_z 、 χ_z 为指数函数对应的系数。

确定设备存在安全风险的台数 K , 按照正常、注意、严重进行需检修概率划分进而得出关键断面通道需检修的概率为

$$K = \sum_{z=1}^4 \kappa(g) K_z \quad (15)$$

式中, K_z 为需要检修的设备数。

对于双特高压直流馈入网架的断面检修, 需要考虑检修过程对电网运行带来的安全运行风险 J_z 。因此, 综合考虑检修发生概率的前提下付出的额外控制代价及对应的发生安全风险概率, 具体为

$$J_z = \sum_{l=1, z \neq l}^z \Delta P_{zl} \kappa(g) \quad (16)$$

式中, ΔP_{zl} 为检修发生概率的前提下付出的额外控制代价。

3.2 断面通道检修评估方法及步骤(图 2)

在建立基于安全风险概率的关键断面通道检修评估方法和评估模型后, 具体对关键断面通道进行检修评估, 其具体步骤如下:

- 1) 首先确定双 UHVDC 馈入受端网架关键断面;
- 2) 计算关键断面内通道检修后两条 HVDC 间 MSCR 和 HSCR, 并判断其值所代表的系统强弱;

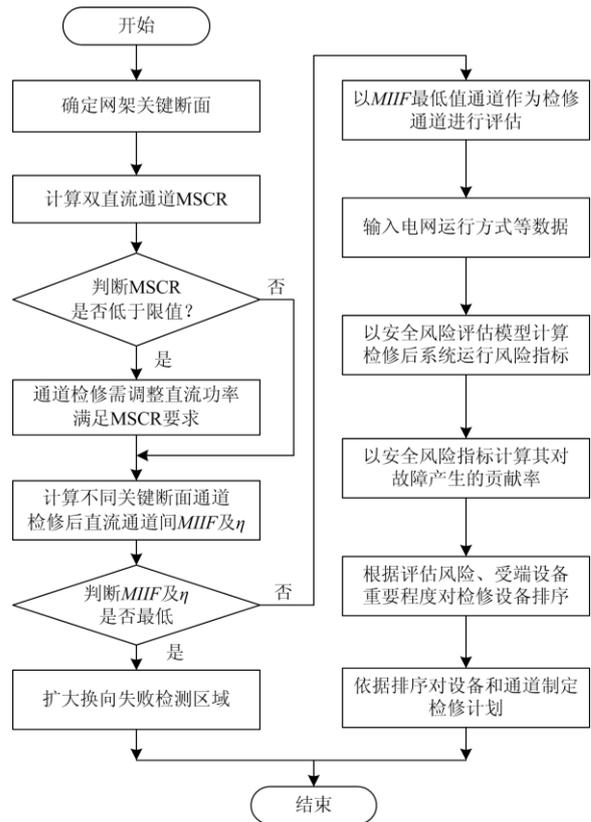


图 2 断面通道检修评估方法流程图
Fig. 2 Flow chart of maintenance evaluation method for section channel

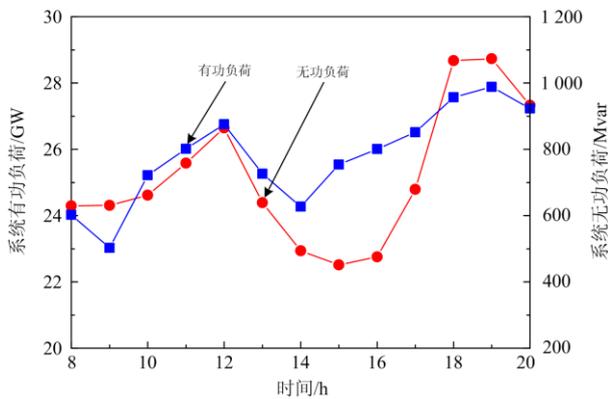


图 4 某省电网典型负荷曲线

Fig. 4 Typical load curve of a provincial power grid

表 6 典型时间段运行方式

Table 6 Operation mode of typical time period

编号	通道检修时间	系统有功负荷量/GW	系统无功负荷量/Mvar
1	9:00—10:00	24.309 692 97	502.8
2	10:00—11:00	24.617 430 47	721.5
3	11:00—12:00	25.585 453 91	801.2
4	12:00—13:00	26.641 496 88	875.6
5	13:00—14:00	24.388 620 70	725.9
6	14:00—15:00	22.940 183 98	627.4
7	15:00—16:00	22.509 205 47	753.6
8	16:00—17:00	22.751 568 16	800.6
9	17:00—18:00	24.794 710 94	851.2
10	18:00—19:00	28.673 903 13	956.9

表 7 典型时间段检修评估结果

Table 7 Maintenance evaluation results of typical time period

编号	通道检修时间	运行风险指标	停运检修后风险指标	模糊风险贡献率/%
1	9:00—10:00	0.152	0.089	20.72
2	10:00—11:00	0.282	0.102	31.91
3	11:00—12:00	0.352	0.124	32.39
4	12:00—13:00	0.427	0.136	44.07
5	13:00—14:00	0.325	0.125	30.77
6	14:00—15:00	0.126	0.071	21.83
7	15:00—16:00	0.187	0.035	40.64
8	16:00—17:00	0.358	0.105	35.34
9	17:00—18:00	0.297	0.099	33.33
10	18:00—19:00	0.129	0.023	41.09

由表 7 可以看出，对 ZZ-JW 和 HD-XF 1 通道进行检修评估以后，500 kV 线路 N-1 故障导致断面通道检修时间在 12:00—13:00 时运行风险和停运检修后风险最大，分别为 0.427 和 0.136。按模糊风险贡献率占 50% 计算，其贡献率最高为 44.07%。需要说明的是，本文提出的关键断面通道安全

风险概率评估方法既适用于基于典型日负荷曲线的评估，也适用于基于典型季节性负荷曲线的评估。应用于后者时，需要依托季节性负荷曲线抽取典型的季节性负荷运行方式作为输入条件即可。

4.3 通道检修暂态时域仿真案例

青豫直流投运后某月，根据生产检修计划安排，计划检修图 3 所示的 ZZ-JW 线及 HD-XF I 线。由表 4 和表 5 可知，其多馈入短路比低至 3.015，同时其耦合系数相对较大为 0.149，因此极有可能发生功角振荡风险。

由图 3 可知，该回路复合检修停运元件均属于两回直流落点中间地区，当 SS-HJ 双回线路发生同跳，则该电网在交流电气联系上形成“北部片区(天中直流落点片区)仅通过 HD-XFII 线与南部片区(青豫直流落点片区)单线路相连”的拓扑结构，运行风险较大。采用电力系统综合稳定分析程序-PSASP7.51 版进行 SS-HJ 双回线路三相永久性短路故障、保护跳双回线路故障时域仿真，故障设置超始时间为 1 s，故障地点为 SS-HJ I 线 SS 侧的 2% 处，本侧双回线路断开时刻为 1.1 s，对侧两线路断开时刻为 1.11 s。仿真结果如图 5—图 7 所示。

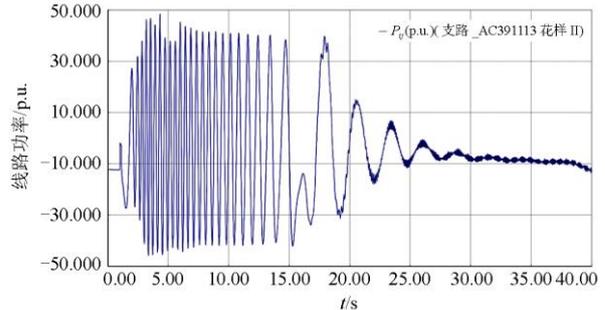


图 5 HD-XF II 线有功功率振荡曲线图

Fig. 5 Active power oscillation curve of HD-XF II line

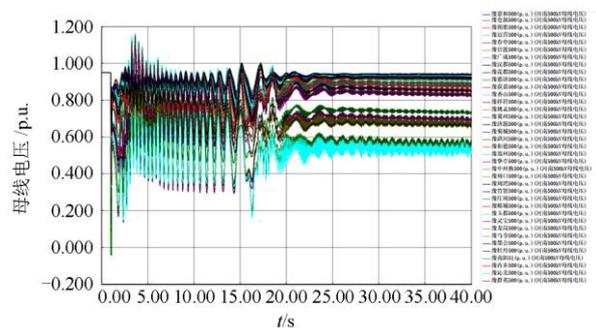


图 6 电网 500 kV 枢纽站母线电压振荡曲线图

Fig. 6 Bus voltage oscillation curve of 500 kV hub station in grid

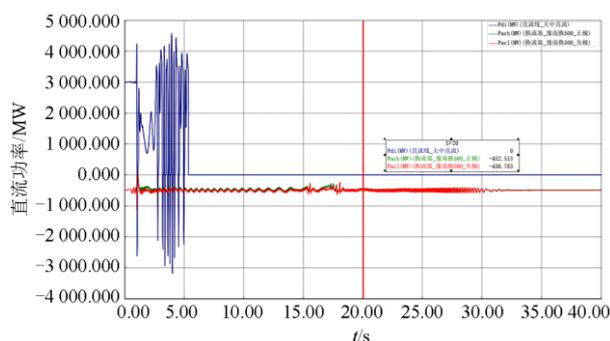


图 7 电网两回直流有功功率振荡图形

Fig. 7 Oscillation graph of two DC active power in power grid

由图 5—图 7 可以看出, 当 SS-HJ 双回线发生永久性短路故障跳闸后, 直流落点两个片区由于瞬间变为单一交流联络线相连, 在短路冲击和功率转移冲击的作用下, 联络线达到静稳极限, 进而发生了两个直流落点区域机群之间的功角异步振荡, 并以此功率振荡为先导, 导致两个区域内的电压发生持续振荡, 而由于唯一的联络线位于两个直流落点之间, 即振荡中心(电压跌落置零)的位置在两个直流落点近区迁移, 致使两回直流由近区交流电压跌落引起持续换相失败, 最终导致了其中一回直流闭锁, 另一回直流持续振荡。需要说明的是, 经验上为简化观察期间, 一般在机电暂态仿真中是通过观察直流功率输出是否振荡过零点来判断是否发生 1 次换相失败。

实际生产中, 经校核与暂稳实际分析, 该复合停运方式最终被列为禁止同停方式。

5 结论

针对双 UHVDC 馈入受端网架关键断面检修策略研究, 以定量计算方式评估受端网架关键断面通道检修时对系统整个关键断面运行稳定性的影响, 得到如下结论:

1) 本文所提的网架强度评估指标(多馈入短路比、多馈入交互因子及直流耦合指数)可有效评估双直流馈入网架结构断面通道强度及耦合系数, 为检修通道的选取提供参考。

2) 采用基于安全风险概率对断面通道检修的评估方法可对断面通道检修时的运行风险指标进行评判, 并充分分析检修对其他直流馈入网架的影响, 通过算例分析得出采用模糊风险贡献率方法提高评估准确率高达 44.07%。

3) 通过暂态案例仿真分析可知, 在低多馈入短路比和高耦合系数的直流回路之间, 当某一回路发生故障时, 联络线极易突破静态稳定极限, 发生功

角振荡, 进而发生换相失败。

参考文献

- [1] 李凌飞, 胡博, 黄莹, 等. 混合多端特高压直流输电系统可靠性评估[J]. 南方电网技术, 2018, 12 (11): 79-89. LI Lingfei, HU Bo, HUANG Ying, et al. Reliability evaluation of hybrid multi terminal UHVDC transmission system[J]. Southern Power Grid Technology, 2018, 12(11): 79-89.
- [2] 赖昱光. 直流通道检修的安全风险量化评价指标与算法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014. LAI Yuguang. Research on quantitative evaluation index and algorithm of safety risk of DC channel maintenance[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [3] 宋金钊, 李永丽, 曾亮, 等. 高压直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(22): 1-13. SONG Jinzhao, LI Yongli, ZENG Liang, et al. A review of commutation failure for LCC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22): 1-13.
- [4] 王少辉, 唐飞, 向农. 华东电网多直流同时换相失败仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 16-21. WANG Shaohui, TANG Fei, XIANG Nong. Commutation failure simulation analysis of East China power grid multiple HVDC lines[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 16-21.
- [5] 王晶, 梁志峰, 江木, 等. 多馈入直流同时换相失败案例分析及仿真计算[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(4): 141-146. WANG Jing, LIANG Zhifeng, JIANG Mu, et al. Case analysis and simulation of commutation failure in multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4): 141-146.
- [6] 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): 116-124. YU Chenxi, KONG Weilu, YU Baihong, et al. Multi-objective optimization of generation maintenance scheduling considering demand response[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 116-124.
- [7] 齐山成, 史志鸿, 马临超, 等. 输电线路主成分状态量风险信息熵的检修计划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 96-101. QI Shancheng, SHI Zhihong, MA Linchao, et al. Study of maintenance schedule for the risk information entropy of principle component state of transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 96-101.
- [8] 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.
- [9] APOSTOLOV A. Efficient maintenance testing in digital substations based on IEC 61850 edition 2[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(4): 407-420. DOI: 10.1186/s41601-017-0054-0.
- [10] 林伟芳, 易俊, 汤涌, 等. 分层直流短路比的定义和应用[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(22): 6627-6635.
LIN Weifang, YI Jun, TANG Yong, et al. Definition and application of hierarchical infeed DC short circuit ratio[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(22): 6627-6635.
- [11] 徐式蕴, 吴萍, 赵兵, 等. 哈郑直流受端华中电网基于响应的交直流协调控制措施[J]. *电网技术*, 2015, 39(7): 1773-1778.
XU Shiyun, WU Ping, ZHAO Bing, et al. Coordinated control strategy of interconnected grid integrated with UHVDC transmission line from Hami to Zhengzhou[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(7): 1773-1778.
- [12] 章枫, 辛焕海, 徐谦, 等. 直流多馈入系统的广义短路比: 影响因素分析[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(18): 5303-5312.
ZHANG Feng, XIN Huanhai, XU Qian, et al. Generalized short circuit ratio of multi infeed DC system: analysis of influencing factors[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(18): 5303-5312.
- [13] 田宝焯, 袁志昌, 余昕越, 等. 混合双馈入系统中 VSC-HVDC 对 LCC-HVDC 受端电网强度的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(12): 3443-3454.
TIAN Baoye, YUAN Zhichang, YU Xinyue, et al. Influence of VSC-HVDC on the strength of LCC-HVDC receiving power grid in hybrid dual-infeed HVDC system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(12): 3443-3454.
- [14] 刘炜, 郭春义, 赵成勇. 混合双馈入直流输电控制系统交互影响机理分析[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(13): 3757-3766.
LIU Wei, GUO Chunyi, ZHAO Chengyong. Mechanism analysis of control interactions in dual-infeed hybrid HVDC system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(13): 3757-3766.
- [15] 杨晓辉, 尹玉君, 寇晓适. 基于风险评估的特高压受端电网输电设备检修策略研究[J]. *电力工程技术*, 2017, 36(2): 72-75.
YANG Xiaohui, YIN Yujun, KOU Xiaoshi. Research on the maintenance strategy of UHV receiving end power transmission equipment based on risk assessment[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2017, 36(2): 72-75.
- [16] 贺庆, 张宝家, 马士聪. 特高压交直流接入下山东断面输电能力提高措施[J]. *电网技术*, 2018, 42(1): 126-132.
HE Qing, ZHANG Baojia, MA Shicong. Research on measures increasing transmission capacity of Shandong section under UHV AC/DC access[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(1): 126-132.
- [17] 赵国勇. 日前计划方式断面输电极限快速评估方法研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2018.
ZHAO Guoyong. Research on the rapid assessment method of cross-section transmission limit in the plan mode recently[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2018.
- [18] 邵瑶, 汤涌. 多馈入直流系统交互作用因子的影响因素分析[J]. *电网技术*, 2013, 37(3): 794-799.
SHAO Yao, TANG Yong. Analysis of influencing factors of multi-infeed HVDC system interaction factor[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(3): 794-799.
- [19] CHEN K, LUO J, ZHOU T, et al. Summary of research on multi-infeed short circuit ratio in AC and DC systems[C] // 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), October 20-22, 2018, Beijing, China.
- [20] LIU Y, CHEN Z. Short circuit ratio analysis of multi-infeed HVDC system with a VSC-HVDC link[M]. IEEE Press, 2011.
- [21] WANG Chenxing, GUAN Lin. Research on limitation of the multi-infeed short circuit ratio[C] // IEEE PES Asia-pacific Power & Energy Engineering Conference, October 25-28, 2016, Xi'an, China: 712-715.
- [22] LIU Yan, CHEN Zhe. A flexible power control method of VSC-HVDC link for the enhancement of effective short-circuit ratio in a hybrid multi-infeed HVDC system[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(2): 1568-1581.
- [23] 何乐彰, 张忠会, 姚峰, 等. 基于设备运行风险等级的检修策略研究[J]. *水电能源科学*, 2014, 32(4): 204-206.
HE Lezhang, ZHANG Zhonghui, YAO Feng, et al. Maintenance strategy based on operational risk grade of equipment[J]. *Water Resources and Power*, 2014, 32(4): 204-206.

收稿日期: 2020-11-01; 修回日期: 2020-11-30

作者简介:

刘 轶(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为特高压混联电网省级电力调度控制运行分析与管理; E-mail: liuyi1@ha.sgcc.com.cn

谢 岩(1990—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统分析与控制. E-mail: xieyan@epri.sgcc.com.cn

(编辑 葛艳娜)