

基于风险评估的特高压受端电网输电设备检修策略研究

杨晓辉¹, 尹玉君², 寇晓适¹

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052;

2. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211106)

摘要:特高压交直流大容量输电对于保障受端电网供电可靠性意义重大。结合工程实践,研究了面向特高压受端电网的输电设备协调检修策略。以华中地区某特高压落点省级电网为例,分析并找出受端电网中与特高压输送功率存在强耦合关系的重要设备;依据设备检修引入的电网运行风险量化评估指标,提出了相关设备与特高压的检修协调原则及设备检修安排的优先顺序。提出的方法对于特高压受端电网编制年度检修计划,保障特高压正常运行具有借鉴意义。

关键词:检修策略; 风险评估; 特高压; 受端电网

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)02-0072-04

0 引言

设备检修是保证设备安全和电网运行可靠性的一项重要措施,随着电网规模的日益扩大和设备数量的急剧增加,科学合理的设备检修策略显得尤为重要。特高压交直流具有大容量、远距离输电的显著特征,其运行状态直接关系到受端电网的供电可靠性。因此,受端电网在制定设备检修计划时,必须优先考虑相关设备与特高压直流的协同配合,避免因检修安排不当造成特高压的非正常运行。

根据设备实际状态制定检修计划,相比传统的定期检修方式可以显著提高电网整体运行的可靠性和经济性^[1]。目前,我国电力系统正在从定期检修逐步向状态检修过渡^[2],然而现有的状态检修主要从设备个体角度出发制定检修策略^[3,4],对电网运行中设备间的关联性、设备检修对电网的影响考虑不足,作出的决策结果可能引起较大的系统损失,这一问题已经引起了学术界的广泛关注^[5-8]。文献[9]介绍了一种考虑系统风险的输电系统检修规划方法,不仅给出了最低风险检修计划,而且给出了计划停运期间最可靠的系统运行方式。文献[10]以供电售电损失最小为优化目标,建立供电设备检修计划优化模型,并采用改进遗传算法进行求解。上述文献从系统角度来制定设备检修计划,但没有考虑设备状态因素对检修的影响。文献[11]提出了电网状态检修的概念,研究了电网检修风险和故障风险的数学表达,构建了以检修风险和故障风险最小为目标函数的状态检修决策模型。文献[12]提出一种计及设备故障风险及电网运行风险

的输变电设备状态检修决策优化模型,以“综合风险费用最小”为优化目标,对待修设备的检修时序进行了优化。文献[13]提出了一种以设备状态为基础的故障率计算、风险评估方法,利用多目标优化的辅助决策方法实现检修策略的优化。文献[14]提出以设备当前状态给系统带来的风险增量作为重要度评价指标,建立了以系统电量不足期望最小为目标函数的输电设备检修计划模型。

当前,针对特高压受端电网设备检修引起的系统风险分析和检修决策优化研究仍有不足。本文在已经获得设备状态检测结果的基础上,以系统风险最小为优化目标,提出了一种综合考虑设备状态和安全稳定评估结果的系统风险量化评估指标,依据该指标给出了设备检修时段安排和检修排序建议。通过实际算例分析,表明了该方法的可行性。

1 基于状态评价的设备故障率计算

设备故障率是系统风险评估的基础,而设备的健康状态对设备的故障率有着直接影响^[15]。运行人员依据设备状态检测结果和国家电网公司颁布的 Q/GDW 1168—2013,对设备各状态量进行量化评估,得出设备的状态分值和设备状态等级(分4种:正常、注意、异常、严重)。每种设备状态等级对应一个缺陷指数区间^[16],见表1。

表1 设备状态与缺陷指数区间的关系

Table 1 Equipments condition and defect index

| 设备状态 | 正常 | 注意 | 异常 | 严重 |
|--------|-----|-----|-----|-----|
| 缺陷指数区间 | 0~1 | 1~2 | 2~3 | 3~4 |

假定设备故障概率与其缺陷指数之间服从指数分布规律,如式(1)所示:

$$\gamma(d) = A e^{Bd} + C \quad (1)$$

式(1)中: γ 表示缺陷指数为 d 时设备的故障率; A, B, C 为未知系数。

根据统计数据来求式(1)中 A, B, C 取值方法。收集本地区近年(2年以上)的同类设备状态区间分布数据和故障台数,见表2。

表2 历史数据统计清单

| 故障台数 | 正常 | 注意 | 异常 | 严重 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| N_0 | N_1 | N_2 | N_3 | N_4 |

设备故障率应满足的一般方程式为:

$$N_0 = \sum_{i=1}^4 \gamma(d_i) N_i \quad (2)$$

式(2)中: N_0 为统计周期内发生故障设备的总台数; N_1-N_4 为缺陷指数落在所划分的4个区间的台数; d_i 为缺陷指数,推荐分别取统计样本状态在各区间的中值,0.5,1.5,2.5和3.5。

利用数值方法求得系数 A, B, C 后,便可得到故障率与缺陷指数之间的具体函数解析表达式。

2 系统风险评估模型

对于特高压受端电网而言,由于设备检修停运带来的电网输电能力下降,对受端电网和特高压的运行都可能造成不利影响。本文充分考虑受端电网输电通道/设备与特高压之间的关联性,以停运设备对特高压和受端电网输电能力的影响程度作为评价指标,用故障概率与控制代价相结合而形成的风险指标来量化这种影响,即:

$$R_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n \Delta P_{ij} \gamma_j \quad (3)$$

式(3)中: R_i 为设备 i 检修引入的系统运行风险; n 为特高压敏感输电断面的设备集合; ΔP_{ij} 为设备 i 检修方式下,解决设备 j 故障所需的控制代价,用特高压或送端机组减出力容量表示, MW; γ_j 为基于状态评价的设备 j 故障率。

3 考虑系统风险的特高压受端输电设备检修决策流程

考虑系统风险的特高压受端电网输电设备检修计划制定流程如图1所示。

(1) 利用功率转移比指标,筛选出受端电网中与特高压输送功率存在强耦合关系的重要输电断面,得到参与风险评估的设备集合。

(2) 根据设备状态评价结果估算重要输电断面中相关线路的故障率。

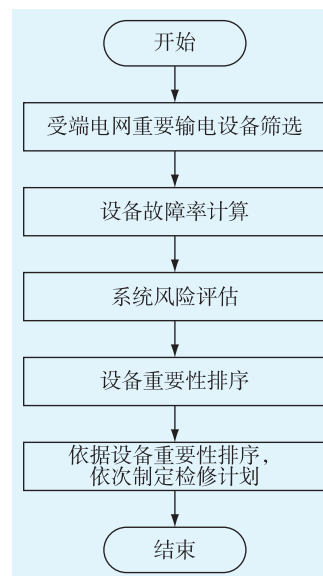


图1 输电设备检修计划制定流程

Fig.1 Flow chart of planning transmission maintenance schedule

(3) 对重要输电断面中某一线路检修方式进行安全稳定评估,得到该线路检修方式下存在安全稳定风险的预想故障集和对应的控制代价,计算系统风险指标。

(4) 对重要输电断面中所有线路逐一重复步骤(3)。

(5) 根据各线路检修对系统运行风险影响建立设备重要性排序表,依次进行检修计划编制。

4 算例分析

应用本文所建立的设备故障概率和风险评估模型,对华中地区某特高压直流受端电网2016年的500 kV 输电线路检修安排进行决策优化。该电网2014年投运±800 kV 特高压直流输电工程,额定输送容量8000 MW,通过6回500 kV 线路送出^[17],特高压受端近区电网网架示意图如图2所示。

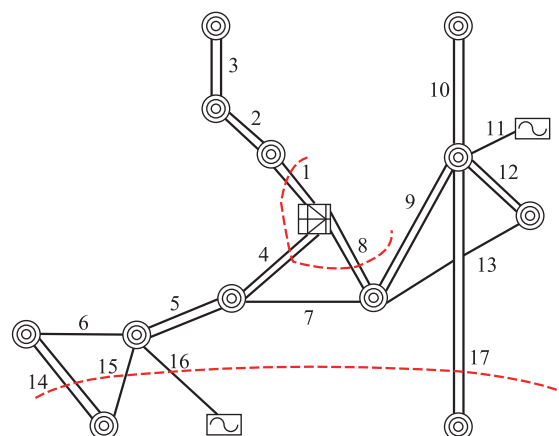


图2 特高压受端电网近区网架示意图

Fig.2 Diagram of UHV receiving power grid

以2016年枯水期电网典型运行方式数据为基础,考虑不同负荷水平和特高压输送功率的组合,分4种方式进行系统风险评估及检修策略研究,如表3所示。

表3 4种方式说明

Table 3 Four operation modes of power grid

| 方式 | 方式说明 | 特高压输送功率/MW |
|-----|-------|------------|
| 方式1 | 枯季大负荷 | 8000 |
| 方式2 | 枯季大负荷 | 7200 |
| 方式3 | 枯季小负荷 | 7200 |
| 方式4 | 枯季小负荷 | 4000 |

利用功率转移比指标,找出与特高压输电功率水平存在强耦合关系的输电通道及组成线路:双回线1+双回线4+双回线8组成的特高压送出断面(简称断面A)和双回线14+双回线17+15+16组成的中部—南部电网输电断面(简称断面B)。对断面A和断面B组成线路分别进行设备状态评价和故障率估算,设备状态及故障率估算结果见表4。

表4 输电设备状态及故障率

Table 4 Status and failure rate of transmission equipment

| 断面名 | 线路名 | 设备状态 | 故障率 |
|------|--------|------|----------|
| 断面 A | 线路 1a | 正常 | 0.000 17 |
| | 线路 1b | 正常 | 0.000 17 |
| | 线路 4a | 正常 | 0.000 17 |
| | 线路 4b | 注意 | 0.001 44 |
| | 线路 8a | 注意 | 0.001 44 |
| | 线路 8b | 注意 | 0.001 44 |
| 断面 B | 线路 14a | 异常 | 0.012 00 |
| | 线路 14b | 异常 | 0.012 00 |
| | 线路 15 | 正常 | 0.000 17 |
| | 线路 16 | 注意 | 0.001 44 |
| | 线路 17a | 正常 | 0.000 17 |
| | 线路 17b | 正常 | 0.000 17 |

以方式1输电断面A中线路8a检修为例,系统风险指标计算过程如下:对方式1线路8a停运情况下的系统进行N-1安全分析,得到存在安全稳定风险的预想故障集和对应的控制措施,见表5。由式(3)得到线路8a检修方式下的特高压运行风险为4.80。

4种方式下输电断面A、断面B设备检修情况下的系统风险评估结果见表6、表7。

由表6、表7可知:(1)在特高压满功率方式下,断面A、断面B都不宜安排线路检修;(2)断面A设备检修风险与特高压输送功率水平密切相关,断面A设备检修时段建议安排在特高压单级运行或停运方式。根据线路检修造成影响大小,建议的

表5 线路8a检修方式N-1安全分析

Table 5 N-1 security analysis of line 8a maintenance mode

| 故障设备 | 安全稳定问题 | 控制措施 |
|-------|----------------------------------|-------------------|
| 线路 8b | 线路 7 过载 16.6% | 减少特高压输电功率 1900 MW |
| 线路 4a | 线路 8b 过载 10.3%; 线路 4b 过载 8.1% | 减少特高压输电功率 1200 MW |
| 线路 4b | 线路 8b 过载 10.3%; 线路 4a 过载 8.1% | 减少特高压输电功率 1200 MW |
| 线路 1a | 线路 8b 过载 2.6% | 减少特高压输电功率 400 MW |
| 线路 1b | 线路 8b 过载 2.6% | 减少特高压输电功率 400 MW |

表6 断面A设备检修风险评估结果

Table 6 Risk assessment results of transmission interface A

| 线路名 | 系统风险 | | | |
|------|------|------|------|------|
| | 方式 1 | 方式 2 | 方式 3 | 方式 4 |
| 线路 1 | 1.15 | 0 | 0 | 0 |
| 线路 4 | 3.45 | 1.15 | 1.10 | 0 |
| 线路 8 | 4.80 | 2.23 | 2.05 | 0 |

表7 断面B设备检修风险评估结果

Table 7 Risk assessment results of transmission interface B

| 线路名 | 系统风险 | | | |
|-------|------|------|------|------|
| | 方式 1 | 方式 2 | 方式 3 | 方式 4 |
| 线路 14 | 5.70 | 4.18 | 0.64 | 0 |
| 线路 15 | 1.15 | 0.82 | 0 | 0 |
| 线路 16 | 5.86 | 3.30 | 0.34 | 0 |
| 线路 17 | 3.57 | 2.92 | 0.13 | 0 |

检修优先顺序是线路8、线路4、线路1;(3)相比断面A,影响断面B设备检修风险的主要因素是负荷水平,大负荷方式下设备检修风险明显高于小负荷方式。断面B线路检修建议安排在小负荷方式,建议的检修优先顺序是线路14、线路16、线路17、线路15。

5 结语

本文基于潮流分析和功率转移比指标,找出了受端电网中与特高压输送功率存在强耦合关系的重要输电断面,基于设备状态评价和系统安全稳定分析结果,对检修方式下的系统风险进行了量化评估,提出了受端电网重要输电设备与特高压的检修协调原则,并在此基础上给出了设备检修安排的排序建议,为检修人员合理编制输变电设备检修计划提供了科学决策依据。

参考文献:

- [1] 许婧,王晶,高峰,等. 电力设备状态检修技术研究综述[J]. 电网技术, 2000, 24(8): 48-52.

- XU Jing, WANG Jing, GAO Feng, et al. A survey of condition based maintenance technology for electric power equipments [J]. Power System Technology, 2000, 24(8): 48-52.
- [2] Q/GDW 1168—2013. 转变电设备状态检修试验规程[S]. Q/GDW 1168—2013. Regulations of condition-based maintenance & test for electric equipment[S].
- [3] 漆伟之. 电气设备状态检修的实践[J]. 江苏电机工程, 2006, 25(1): 14-17.
- QI Weizhi. The practice of electrical equipment maintenance based on state [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2006, 25(1): 14-17.
- [4] 谢达境. 输变电设备状态检修工作在国内外地开展现状[J]. 企业技术开发, 2011, 30(24): 105-106.
- XIE Dajing. Present situation of condition-based maintenance for transmission and transformation equipment at home and abroad[J]. Technological Development of Enterprise, 2011, 30(24): 105-106.
- [5] 余杰, 周浩, 黄春光. 以可靠性为中心的检修策略[J]. 高电压技术, 2005, 31(6): 27-28.
- YU Jie, ZHOU Hao, HUANG Chun guang. Maintenance strategies based on RCM[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(6): 27-28.
- [6] 刘有为, 弓艳朋. 基于受端供电可靠性的检修策略分析[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 139-143.
- LIU Youwei, GONG Yanpeng. Maintenance strategy analysis based on power supply reliability of demand side [J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 139-143.
- [7] 汤宗亮, 衡思坤, 韦海荣. 电网设备系统检修策略[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(3): 53-58.
- TANG Zongliang, HENG Sikun, WEI Hairong. A strategy for power grid equipment maintenance[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2014, 33(3): 53-58.
- [8] 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.
- [9] 李文沅. 电力系统风险评估: 模型、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 181-194.
- LI Wenyuan. Power system risk assessment: model, method and application[M]. Beijing: Science Press, 2005: 181-194.
- [10] 林灵兵, 刘宪林, 韩源. 供电设备检修计划优化模型和算法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(8): 91-94.
- LIN Lingbing, LIU Xianlin, HAN Yuan. Optimization model and algorithm for maintenance scheduling of power supply equipments[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(8): 91-94.
- [11] 李明, 韩学山, 杨明, 等. 电网状态检修概念与理论基础研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 43-52.
- LI Ming, HAN Xueshan, YANG Ming, et al. Basic concept and theoretical study of condition-based maintenance for power transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 31(34): 43-52.
- [12] 潘乐真, 鲁国起, 张焰, 等. 基于风险综合评判的设备状态检修决策优化[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(11): 28-32.
- PAN Lezhen, LU Guoqi, ZHANG Yan, et al. Decision-making optimization of equipment condition-based maintenance according to risk comprehensive evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(11): 28-32.
- [13] 胡文堂, 高胜友, 鲁宗相, 等. 利用设备风险评估的检修策略优化[J]. 高电压技术, 2010, 36(11): 2699-2704.
- HU Wentang, GAO Shengyou, LU Zongxiang, et al. Maintenance strategies optimization of equipment using risk assessment[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(11): 2699-2704.
- [14] 赵登福, 段小峰, 张磊. 考虑设备状态和系统风险的输电设备检修计划[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(3): 84-89.
- ZHAO Dengfu, DUAN Xiaofeng, ZHANG Lei. Maintenance scheduling of power transmission equipment considering equipment condition and system risk [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(3): 84-89.
- [15] 王慧芳, 杨荷娟, 何奔腾, 等. 输变电设备状态故障率模型改进分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16): 27-31.
- WANG Huifang, YANG Hejuan, HE Benteng, et al. Improvement of state failure rate model for power transmission and transforming equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 27-31.
- [16] Q/GDW 1903—2013 转变电设备风险评估导则[S]. Q/GDW 1903—2013 Transmission and transformation equipments risk assessment guide rule[S].
- [17] 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. 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.

作者简介:



杨晓辉

杨晓辉(1982—),女,河南洛阳人,高级工程师,从事输变电设备试验检测及设备状态评价研究工作;

尹玉君(1978—),男,湖北武汉人,高级工程师,从事电网安全稳定分析与控制研究工作;

寇晓适(1978—),男,河南许昌人,高级工程师,从事输变电设备试验检测及设备状态

评价研究工作。

(下转第93页)

Research on Calculation of Short-circuit Current Based on PSD-SCCP and PSASP

ZHANG Man¹, SHI Chao¹, XU Wenchao¹, SUN Wentao²

(1. China Energy Engineering Group Co. Ltd Jiangsu Electric Power Design Institute Co., Nanjing 211102, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Economic Research Institute, Nanjing 210008, China)

Abstract: PSD-CCP and PSASP are two commonly used software for short-circuit current calculation at present in domestic, however, the calculation results differs under different calculation conditions, affecting power grid planning and decision-making. With consideration of three standards for short-circuit current calculation, differences between them are analyzed, then some factors such as line and transformer resistances, line capacitors, reactive power compensation and static load affecting short-circuit current calculation results are analyzed theoretically combined with the equivalent circuit. Finally, six different short-circuit current calculation methods are adopted based on PSD-SCCP and PSASP using Jiangsu power grid planning architecture in some year during 2016-2020 as an example, and recommendations are put forward through comparing the calculation results, in order to provide reasonable reference and ideas for short-circuit current calculation in power grid planning and the early stage of project design.

Key words: PSD-SCCP; PSASP; short-circuit current; calculation method

(编辑 刘晓燕)

(上接第 75 页)

Research on the Maintenance Strategy of UHV Receiving End Power Grid Transmission Equipment Based on Risk Assessment

YANG Xiaohui¹, YIN Yujun², KOU Xiaoshi¹

(1. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China.

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

Abstract: UHV AC/DC power transmission is of great significance to ensure the power supply reliability of the receiving power grid. In combination with the engineering practice, the coordination and maintenance strategy of transmission equipment for UHV receiving power network is studied in this paper. Take the case of a provincial power grid in central China, the important equipments in this UHV receiving power grid, strongly coupled with UHV transmission power, are found out. According to the quantitative evaluation index of power grid operation risk, maintenance principle and priority of maintenance arrangement for the relevant equipments are put forward. The proposed method can be used for the preparation of the annual maintenance plan for an UHV power grid.

Key words: maintenance strategy; risk assessment; UHV; receiving end power grid

(编辑 徐林菊)

1000 kV 泰州和苏州变电站扩建主变工程开工

2017年3月17日,1000 kV 泰州、苏州变电站扩建主变压器工程开工建设。据介绍,1000 kV 泰州站将扩建第2台主变压器,1000 kV 苏州站将扩建第3、第4台主变压器,以及相应的特高压开关、电容器、电容式电压互感器(CVT)、三次侧设备、500 kV 侧设备等。1000 kV 泰州、苏州站扩建主变工程核准动态总投资分别为4.27亿元、9.45亿元,计划分别于2017年12月、2018年5月建成投运。泰州站扩建主变工程建成后,将满足±800 kV 锡盟—泰州特高压直流工程分层接入降压容量的需求,满足地方经济社会的用电需求;苏州站扩建主变工程建成后,将有利于提高苏南电网、上海电网接纳区外电力能力及内部电力交换能力,满足特高压来电降压需求,提高电网的安全稳定水平和供电可靠性。

(摘编自国网江苏省电力公司网站)