

1-15-2024

Evaluation of carrying capability of the main grid of multi-infeed HVDC receiving-end systems

Xiaoliang JIANG

Economic and Technological Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China

Wanxun LIU

Economic and Technological Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China

Ge YAN

College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China, 1103954781@qq.com

Hongbo SHAO

Economic and Technological Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China

Lihua ZHANG

Economic and Technological Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

See next page for additional authors

Recommended Citation

JIANG, Xiaoliang; LIU, Wanxun; YAN, Ge; SHAO, Hongbo; ZHANG, Lihua; and WEN, Yunfeng (2024)

"Evaluation of carrying capability of the main grid of multi-infeed HVDC receiving-end systems," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 38: Iss. 5, Article 22.

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.05.022

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol38/iss5/22>

This Scientific Research is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology. For more information, please contact dlxb04@163.com.

Evaluation of carrying capability of the main grid of multi-infeed HVDC receiving-end systems

Authors

Xiaoliang JIANG, Wanxun LIU, Ge YAN, Hongbo SHAO, Lihua ZHANG, and Yunfeng WEN

多直流馈入受端电网主网架承载能力评估研究

蒋小亮¹, 刘万勋¹, 严 格², 邵红博¹, 张丽华¹, 文云峰²

(1. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450052; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘 要:随着直流馈入数量和容量的阶越式增长, 中国部分受端电网“强直弱交”特征凸显, 运行形态及稳定特性日趋复杂。考虑多直流馈入受端电网在正常和故障状态下的适应性问题, 提出一种全面评估受端主网架承载能力的多维评估指标体系。该指标体系可用于揭示多直流馈入受端电网在正常状态、故障发生和故障恢复 3 种运行场景下的电网强度、抗扰能力和弹性水平, 从而综合评估受端主网架承载大规模特高压直流馈入的能力。基于河南省电网规划数据开展了应用实证研究, 评估得到制约河南主网架直流承载能力的薄弱环节, 并进一步给出了提升河南省主网架承载能力的应对策略。

关 键 词:特高压直流; 受端电网; 承载能力; 安全稳定性

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.05.022

中图分类号: TM711

文章编号: 1673-9140(2023)05-0216-10

Evaluation of carrying capability of the main grid of multi-infeed HVDC receiving-end systems

JIANG Xiaoliang¹, LIU Wanxun¹, YAN Ge², SHAO Hongbo¹, ZHANG Lihua¹, WEN Yunfeng²

(1. Economic and Technological Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: With the gradual growth of the number and capacity of infeed DC, the characteristic of “strong DC and weak AC” in some receiving power grids have become prominent in China, and the operation patterns and stability attributes have become increasingly complex. This paper considers the adaptability of multi-in-feed HVDC power transmission systems under normal and fault operating conditions. It proposes a multi-dimensional evaluation index system for comprehensively evaluating the carrying capacity of main grid frame of a multi-in-feed HVDC power transmission system. This indicator system can be used to reveal the grid strength, anti-interference ability and resilience level of a multi-in-feed HVDC power transmission system under three operating scenarios: normal state, failure state and fault recovery process, to comprehensively evaluate the capacity to carry HVDC of main grid frame of multi-infeed HVDC power transmission system. Based on the Henan power grid planning data, an application empirical study was carried out, and the weak links that restricted the capacity to carry HVDC of Henan’s primary grid were evaluated. The countermeasures for improving the carrying ability of the primary grid were further given.

Key words: UHVDC; receiving-end power grid; carrying capacity; security and stability

收稿日期: 2021-11-16; 修回日期: 2021-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(52077066); 国网河南省电力公司科技项目(5217L0210005)

通信作者: 严 格(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事多直流馈入受端电网规划与承载能力评估研究; E-mail: 1103954781@qq.com

为了加快实现能源战略转型并积极推进生态建设,大规模关停煤电机组已成为必然趋势。然而,受端电网电力负荷未来仍将保持较大增长,在传统电源空心化的趋势下,受端区域电力供需缺口进一步扩大。特高压直流输电具有功率输送容量大且效率高的优势,通过引入大容量特高压直流输电线路,将清洁电力从区外输送已成为受端电网解决能源保供和环境保护的关键^[1-4]。

目前,华东电网、华中电网和广东电网等受端区域电网已形成多重直流输电线路的格局。作为世界上特高压直流输电引入最多的受端电网,华东电网已建成了准东—皖南、锡盟—泰州、雁淮、向家坝—上海、灵州—绍兴、溪洛渡—浙江、锦苏等7条大容量特高压直流输电线路,其直流输电功率最大可达57 700 MW;根据相关规划,华中地区未来将引入天中、祁邵、青海—河南、陕北—湖北、雅中—江西等5条大容量特高压直流和渝鄂柔性背靠背直流线路,直流供电规模将超过48 500 MW;广东电网已引入10条直流输电线路,其直流输电功率达到39 200 MW。与国外的多重直流供电受端电网不同,中国的直流逆变站分布更密集,输送的直流功率更大,这导致了明显的“强直弱交”特征。

尽管特高压直流工程的建设解决了中国能源分布不均衡的问题,并有助于资源的广泛优化配置,但随着直流输电线路数量和容量的迅猛增长,受端电网“强直弱交”的特征日益凸显。由于多条直流输电线路大规模替代了受端电网的传统火电机组,受端电网等效惯性不断减小,导致频率调节和电压支撑能力不断下降,频率和电压稳定问题变得突出^[5]。目前,受端电网面临着影响主要网格的负载能力提升的现实问题^[6],例如:直流输电密集引入导致电网的静态电压支撑能力不足、机械惯性大幅下降,从而使系统频率稳定性降低^[7]、电网在暂态和动态稳定性方面的问题以及直流输电连续换相故障对电压稳定特性的影响^[8-9]等。另外,直流输电引入地区的电流分布和安全性问题也日益引发关注^[10]。

可见,多重直流密集供电对主电网的电力传输以及故障情况下的电力保障提出了更高的要求。如何有效评估多重直流密集落点区域主电网的承

载能力成为当前规划和设计中急需解决的问题。目前,该领域的相关工作主要从影响多重直流供电受端电网主电网承载能力的单一限制因素出发,研究分析相关因素对直流供电规模的影响机理和稳定特性,文献[11]揭示了单一供电的短路比和电压稳定性之间的本质联系,从特征根的角度提出了一种能够描述多重供电交直流系统强度和稳定性的广义短路比指标;文献[12]通过等效的单一供电模型提出了等效节点电压灵敏度来评估多重供电系统的电压稳定性;文献[13]基于等效的直流功率提出了等效有效短路比指标;文献[14]提出了等效运行短路比,用于评估多重直流供电系统的静态电压稳定性。这些文献都提出了用于评估受端电网的静态稳定性的指标,但电网承载能力还需要综合考虑其他方面的性能;文献[15]定义了一种综合考虑负荷母线和换流站母线电压恢复特性的暂态电压稳定指标来量化评估系统的暂态电压稳定性,并从暂态电压稳定性、静态电压稳定性、功角稳定性、潮流特性和网格支撑强度等5个方面构建了综合评价指标,用于评估故障严重程度;文献[16]同时考虑了多重直流供电受端电网的暂态电压和暂态频率稳定性问题,提出了一种综合考虑直流功率的紧急提升、调相机的紧急控制以及切负荷的紧急协调控制策略;文献[17]从受端交流电网的强度、频率、电压以及暂态稳定性等多个角度出发,评估了华东电网的直流接入能力,但没有考虑直流供电规模扩大后引发的“强直弱交”的特征对交流线路的过载问题;文献[18]对特高压交直流接入后的电网断面潮流进行了综合评估,但没有提出改善潮流问题的电网规划策略。

已有的方法未能从多个层面全面量化多重直流供电受端电网的承载能力,因此不能完全适应多回大容量特高压直流供电下受端电网规划设计的需求。本文针对多重直流供电受端电网在正常运行和故障状态下的适应性问题,提出一种全面评估受端主电网承载能力的多维评估指标体系。该指标体系可用于揭示多重直流供电受端电网在正常运行、故障发生和故障恢复3种运行情景下的电网强度、抗扰能力和弹性水平,从而综合评估受端主电网承载大规模直流供电的能力。本文通过以河

南省电网规划数据为例进行实证研究,评估限制主电网承载能力的薄弱环节,并提出提升主电网承载能力的策略。

1 多直流馈入受端主网架承载能力评估指标体系

1.1 构建思路

为了更好地指导规划建设和维护受端电网安全稳定,需研究如何全面有效评估多回大容量特高压直流馈入格局下受端电网的主网架承载能力。在评估受端电网指标体系的已有研究中,大都从典型问题出发(例如电压问题、频率问题、功角问题),存在考虑维度不全面的问题,很难满足实际密集直流落点受端电网的多适应性要求。为了构建可以综合评估受端电网大容量直流接入适应性的多维指标体系,本文从电网可能的运行状态入手,探寻在正常状态、故障发生和故障恢复过程下制约受端电网主网架承载能力的因素,基于制约因素与现有研究选取可以量化比较主网架承载能力强弱的计算指标。该指标体系的具体构建思路如图1所示。

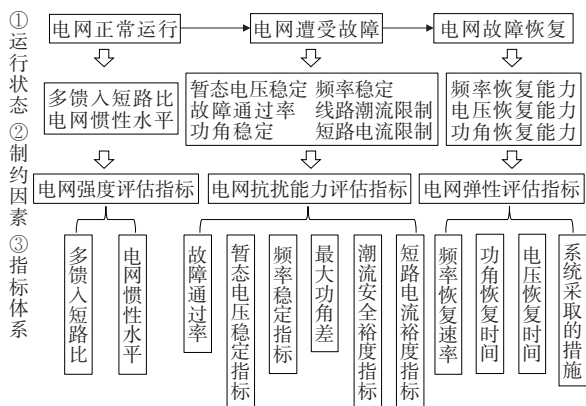


图1 多维指标体系构建流程

Figure 1 The process of building a multi-dimensional index system

在该指标体系下,电网状态覆盖正常运行、遭受故障以及从故障恢复3个场景。电网正常运行状态下的制约因素包括多馈入短路比和系统惯性水平;电网遭受故障状态下的制约因素包括功角稳定、电压稳定、频率稳定、故障通过率、线路潮流转移和短路电流;故障恢复过程中制约因素包括频率

恢复能力、电压恢复能力和功角恢复能力。其中,需分析的预想故障列表包含直流单/双极闭锁、交流 $N-1/N-2$ 故障。

1.2 电网强度评估

可通过电网强度评估指标量化分析电网正常运行状态下的主网架承载能力:采用多馈入短路比指标评估受端交流系统对直流系统的电压支撑能力;采用系统总旋转动能、系统等效惯性时间常数和系统相对惯性常数评估直流馈入对受端电网惯性水平(瞬时频率支撑能力)的影响。

1) 多馈入短路比。

多回直流馈入受端电网时,由于直流落点的电气距离较近,各回直流系统换流站间存在较强的相互作用,短路比对多直流馈入的受端电网强弱的判断不再适用。在此采用CIGRE定义的多馈入短路比(multi-infeed short circuit ratio, MSCR)评估受端电网电压支撑能力^[19-20],MSCR的计算公式为

$$M_{MSCR} = \frac{S_{aci}}{P_{dNi} + \sum_{j,j \neq i} (M_{j,i} P_{dNj})} \quad (1)$$

式中, S_{aci} 为第 i 回直流换流母线处的三相短路容量, $MV \cdot A$; P_{dNi} 为第 i 回直流的额定输送功率, MW ; $M_{j,i}$ 为在第 i 回直流换流母线上施加无功扰动时,第 j 回直流换流母线电压变化量与第 i 回直流换流母线电压变化量的比值。根据实际运行经验, $M_{MSCR} \geq 3$ 时受端系统为强系统, $M_{MSCR} < 2$ 时受端为弱系统, $2 \leq M_{MSCR} < 3$ 时受端为较弱系统。

2) 惯性水平。

惯性水平反映系统在有功不平衡情况下抑制系统频率变化的能力。在此,采用系统总旋转动能、系统等效惯性时间常数和系统相对惯性常数3个指标评估受端电网惯性水平,计算公式分别为

$$H_{sys} = \sum_{i=1}^N H_i S_i x_i \quad (2)$$

$$H_{eq} = \frac{H_{sys}}{\sum_{i=1}^N S_i x_i} \quad (3)$$

$$H_{dc} = H_{sys} \cdot \frac{S_{ac}}{P_{dc}} \quad (4)$$

式(2)~(4)中, H_i 为机组 i 的惯性时间常数; S_i 为机组 i 的额定容量; N 为机组数量; x_i 为机组 i 的开停机

状态(0时为关机,1时为开机); S_{ac} 为系统基准功率; P_{dc} 为直流总馈入容量。等效惯性时间常数越大,系统响应大扰动有功冲击的能力越强。系统相对惯性常数 H_{dc} 用于衡量直流接入受端电网后交流系统机械惯性的相对强弱关系,直流馈入受端电网的规模越大,系统相对惯性常数下降越明显。

1.3 抗扰能力评估

通过电网抗扰能力评估指标量化分析受端电网遭受交/直流故障状态下的适应能力。从故障通过率、暂态电压稳定性、频率稳定性、功角稳定性、潮流安全和短路电流安全6个维度构建电网抗扰能力指标。

1) 故障通过率。

故障通过率为在同一电压等级元件(线路、变压器)发生故障后电网能安全稳定运行的数量占总元件数量的比例。按照故障类型可以分为 $N-1$ 故障通过率和同塔双回线路 $N-2$ 故障通过率。通过率越高表示受端电网应对交流故障的抗扰能力越强。计算公式为

$$\alpha = \frac{N_p}{N} \quad (5)$$

式中, N_p 为故障后电网可以安全稳定运行的情况总数; N 为预想故障总数。

2) 暂态电压稳定指标。

系统暂态电压稳定的重要判据是遭遇故障后,电压能否在10 s内恢复到电压稳定阈值0.9 p.u.以上。本文在文献[15]的基础上采用考虑直流故障后受端电网500 kV母线电压恢复特性的暂态电压稳定指标 T_v ,计算公式为

$$T_v = \frac{\sum_{i=1}^N V_{s,i}}{N} \quad (6)$$

式中, N 为受端电网500 kV母线数量; $V_{s,i}$ 为母线 i 的电压跌落严重度指标,其计算公式为

$$V_{s,i} = \int_{t_c}^{t_c + \Delta t} V_{D,i}(t) dt \quad (7)$$

式中, t_c 为故障发生时刻; Δt 一般设为10 s; $V_{D,i}(t)$ 的计算公式为

$$V_{D,i} = \begin{cases} U_{s,i} - U_i(t), & U_i(t) \leq U_{s,i} \\ 0, & U_i(t) > U_{s,i} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $U_i(t)$ 为母线 i 在时刻 t 的电压幅值; $U_{s,i}$ 为母

线 i 保持暂态电压稳定的阈值,设为0.9 p.u.。直流闭锁故障后 T_v 的值越大,受端电网越容易发生电压失稳。

3) 频率稳定指标。

针对直流闭锁故障带来的巨量有功冲击,以系统惯性中心的频率变化率、极值频率、准稳态频率作为评判系统频率稳定的指标。其中,最大频率变化率的计算公式为

$$R_{\max} = -\frac{\Delta P_L f_0}{2H_{\text{sys}}} \quad (9)$$

式中, ΔP_L 为直流闭锁后系统损失的有功功率; f_0 为正常状态下的系统频率;系统总转动动能 H_{sys} 越大,故障后最大频率变化率越小。

暂态极值频率是直流闭锁故障后系统频率达到的最小值,暂态频率稳定范围为49.0~50.8 Hz。暂态极值频率作为比较性指标,其值偏离50 Hz越远说明系统受该故障的威胁越大。准稳态频率是扰动后系统重新回到准稳态运行点的频率值,是二次调频的重要依据。

4) 功角稳定指标。

为简单判断系统是否发生暂态失稳,采用故障后系统中发电机的最大功角差 δ 作为功角稳定指标,计算公式为

$$\delta = \max |\delta_i - \delta_j| \quad (10)$$

式中, δ_i, δ_j 分别为故障后第 i 台和第 j 台发电机的功角。若故障后系统中发电机组间的功角差不断增大,则系统暂态失稳。

也可基于扩展等面积准则(extended equal area criterion, EEAC)计算功角稳定指标。EEAC是等面积准则(equal area criterion, EAC)由单机无穷大系统扩展到多机系统的结果^[21],其基本思想是通过一个能保持多机系统稳定性的变换把多机问题转化为两机问题,然后利用EAC方法对两机问题计算出临界清楚时间及稳定裕度。

5) 潮流安全裕度指标。

特高压直流馈入受端电网后,直流落点成为潮流汇集中心,会给受端电网造成潮流疏散及安全性问题。因此,定义 ρ 为潮流安全裕度指标:

$$\rho = \frac{P_{\max} - P}{P_{\max}} \quad (11)$$

式中, $P_{\max}$ 为输电线路热稳极限功率; P 为故障后线路传输功率, $\rho > 0$ 时, 其值越大表明潮流安全裕度越大。

6) 短路电流裕度指标。

采用短路电流裕度指标 K 表征短路故障下受端电网 500 kV 母线的载流水平^[22]:

$$K = \frac{I_{\max} - I}{I_{\max}} \quad (12)$$

式中, $I_{\max}$ 为 500 kV 母线 i 允许流过的短路电流上限, 取值为 63 kA; I 为 500 kV 母线发生三相金属性短路时的短路电流大小, $K < 0$ 时不满足安全稳定运行要求, 即系统存在稳定性问题; $K > 0$ 时, 值越大表明短路电流安全裕度越大。

1.4 弹性评估

通过弹性评估指标量化分析受端电网在大扰动故障下的恢复能力。弹性评估指标由频率恢复能力、功角恢复能力、电压恢复能力和系统采取的措施 4 个指标组成。

1) 频率恢复能力指标。

直流闭锁故障清除后, 系统频率将逐步上升至准稳态频率, 采用此过程中的系统频率恢复速率来量化分析系统的频率恢复能力:

$$f_{\text{avg}} = \frac{\max \{f(t)\}}{t_2 - t_1} \quad (13)$$

式中, f_{avg} 为故障后系统频率恢复速率; $f(t)$ 为系统频率函数曲线; t_1 为故障发生时刻; t_2 为系统频率恢复至准稳态频率时刻。

2) 功角恢复能力指标。

在大扰动状态下, 发电机功角差发生较大改变。采用故障清除后的发电机功角恢复时间 t_{ar} 作为功角恢复能力指标, 计算公式为

$$t_{\text{ar}} = t_{\text{ae}} - t_{\text{ac}} \quad (14)$$

式中, t_{ac} 为故障发生时刻; t_{ae} 为系统功角恢复稳定时刻。

3) 电压恢复能力指标。

直流闭锁故障导致母线电压跌落, 故障清除后母线电压恢复越快表明系统电压恢复能力越强。因此, 采用电压恢复时间 t_{ur} 作为电压恢复能力指标, 计算公式为

$$t_{\text{ur}} = t_{\text{ue}} - t_{\text{uc}} \quad (15)$$

式中, t_{uc} 为故障发生时刻; t_{ue} 为系统功角恢复稳定时刻。

4) 系统采取的措施。

在大扰动故障后, 为了保证系统的频率和电压保持或恢复至允许范围内且不出频率崩溃以及电压崩溃的情况, 电网可能会采取某些紧急控制措施, 例如切负荷、直流紧急功率支援等。因而, 可将采取这些控制措施的代价(如切负荷量、直流紧急功率支援量)也作为衡量故障恢复的指标。

2 基于多维指标体系的主网架承载能力评估流程

基于多维指标体系的受端主网架承载能力评估的具体流程如图 2 所示, 详述如下。

1) 获取被评估受端电网的相关规划数据, 包括网架情况、直流馈入功率情况、发电机组出力状况、转动惯量水平、电源情况以及负荷需求。

2) 基于 MATLAB 和 BPA 软件并运用相应公式计算电网强度评估指标, 判断多直流馈入受端电网的多馈入短路比和电网惯性水平指标能否处于正常水平。若多馈入短路比低于 3, 说明受端电网的电压支撑能力不足; 若电网惯性水平过低, 说明受端电网的频率支撑能力不足。

3) 通过 BPA 软件仿真直流单/双极闭锁以及 $N-1/N-2$ 故障, 计算电网抗扰能力指标。若故障通过率低于 100%, 则该网架未能通过 $N-1$ 或同塔双回线路三相短路检验; 若故障后电压未能在 10 s 内恢复至 0.9 p.u. 以上, 则系统暂态电压失稳; 若故障后频率跌落到 49 Hz 以下, 则系统频率失稳; 若故障后最大功角差不断增大, 则系统暂态失稳; 若故障后潮流安全裕度指标小于 0, 则线路过载; 若短路电流裕度指标小于 0, 则系统存在短路电流问题。

4) 在一段时间后清除故障设置, 计算电网弹性评估指标, 分析电网故障后恢复速度。

5) 在上述工作的基础上, 得到各个指标的计算结果, 通过对指标的量化分析, 综合评判多直流馈入受端电网主网架承载能力的强弱, 根据各指标的数值情况确定主网架可能存在的薄弱环节。

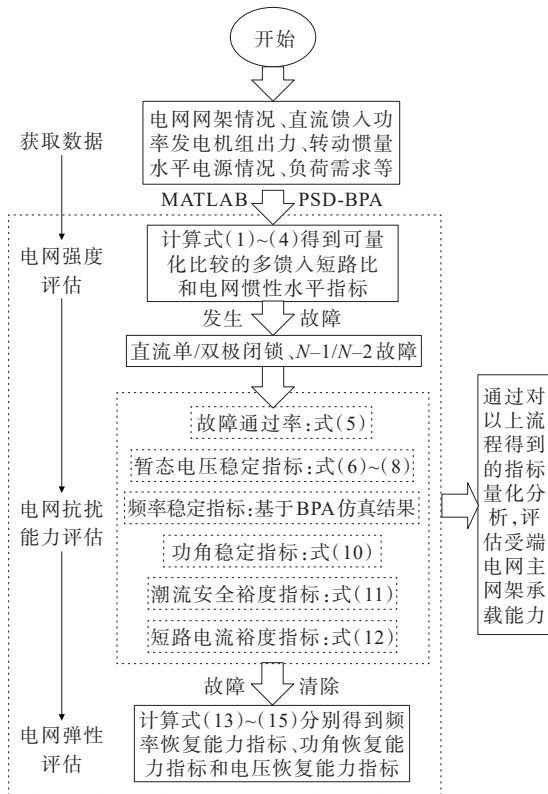


图2 主网架承载能力评估流程

Figure 2 The evaluation process of the carrying capacity of the main grid

3 河南省“十四五”规划主网架承载能力评估

3.1 河南省规划网架简介

基于所构建的多维指标体系对河南省2025年网架规划进行承载能力评估,揭示其在大规模直流馈入下的适应性,明晰可能存在的薄弱环节。根据现有规划,2025年河南电网已发展成为多直流馈入受端电网,馈入的特高压直流包括天中直流和青豫直流,直流馈入总容量达到16 000 MW。其中,天中直流额定容量8 000 MW,落点为中州500 kV变电站,共送出7回,至文化变电站和官渡变电站各2回,至菊城变电站3回,具体方案如图3所示。青豫直流额定容量为8 000 MW,采用分层接入方式高低端各输送4 000 MW,其直流高端通过驻马店直流换流站送出4回,至迟营变电站和螺祖变电站各2回,直流低端与驻马店交流特高压500 kV站合建,通过交流换流站送出5回,至挚亭变电站3回,至周口南变电站2回,具体方案如图4所示。

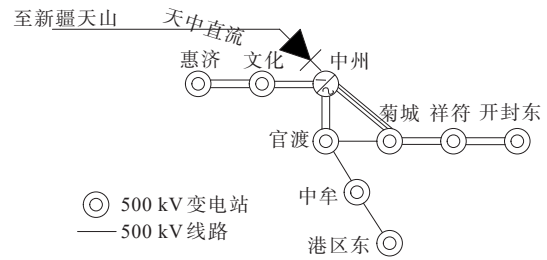


图3 天中直流受端近区网架示意

Figure 3 Transmission scheme of schematic diagram of UHVDC project of Xinjiang-Henan

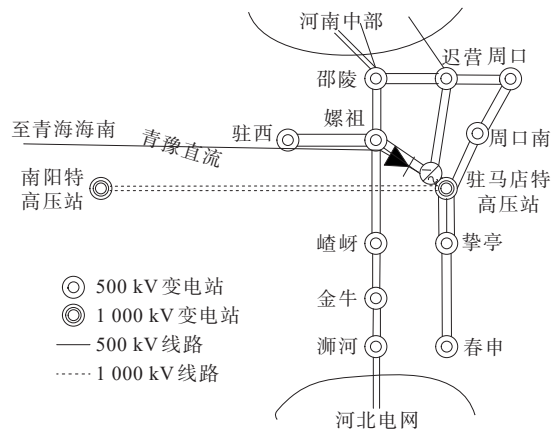


图4 青豫直流受端近区网架示意

Figure 4 Transmission scheme of schematic diagram of UHVDC project of Qinghai-Henan

3.2 主网架承载能力评估结果

在系统强度方面,馈入两回8 000 MW特高压直流的河南规划网架评估指标结果如下。

1) 对河南电网天中直流和青豫直流的多馈入短路比进行计算,其中天中直流的多馈入短路比为4.290,青豫直流高端的多馈入短路比为3.095,青豫直流低端的多馈入短路比为3.423。

2) “十四五”规划期间,河南电网的直流馈入规模由9 400 MW增大至16 000 MW后,电网相对惯性常数由2 615.27 MW·s降至1 811.40 MW·s。

在抗扰能力方面,规划网架的抗扰能力指标评估结果如下。

1) 计算电网500 kV电压等级元件N-1故障以及500 kV同塔双回线路三相短路N-2故障的通过率。其中,N-1的故障通过率为100%,玉都至群英的500 kV双回线路三相短路故障后,电网出现暂态失稳,其原因与内乡电厂扩建后附近网架并未得到同步加强有关。

2) 当特高压直流发生闭锁故障后,系统电压跌落程度较小。

3) 根据天中和青豫直流的输送容量以及夏大方式下总旋转动能为 $289\,824\text{ MW}\cdot\text{s}$,得出直流单极闭锁故障最大频率变化率为 $0.345\,0\text{ Hz/s}$,双极闭锁故障最大频率变化率为 $0.690\,1\text{ Hz/s}$ 。直流闭锁故障后 500 kV 母线极值频率仍保持在 49.80 Hz 以上,满足频率稳定要求。

4) 直流闭锁故障后,系统均未发生暂态失稳。

5) 河南电网的重要输电断面包括豫北—豫中断面、豫中—豫南断面和豫西断面。计算直流双极闭锁故障后输电线路的潮流安全裕度指标,结果如表1所示。从表1中可以发现天中直流双极闭锁后豫中—豫南输电断面的姚孟至涂会 500 kV 输电线路的潮流安全裕度为负值,该条线路出现过载,若直流故障不能及时清除,将会影响河南电网安全稳定运行。

6) 500 kV 母线的短路电流阈值是 63 kA 。如表2所示, 500 kV 母线的三相短路电流均未超过阈值,但存在部分短路电流裕度较小(短路电流大于 53 kA)的 500 kV 母线,需要重点关注。

表1 河南省内重要输电线路潮流安全裕度指标

Table 1 The power flow safety margin index for important transmission lines in Henan Province %

河南重要断面	500 kV 线路	潮流安全裕度指标	
		天中直流 双极闭锁	青豫直流 双极闭锁
豫北—豫中断面	惠济—获嘉 I	90.94	71.35
	惠济—获嘉 II	90.94	71.35
	祥符—塔铺 I	66.15	86.15
	祥符—塔铺 II	66.15	86.15
	嘉和—广成 I	50.48	80.20
豫中—豫南断面	嘉和—广成 II	50.91	80.36
	白河—武周	14.77	49.13
	姚孟—涂会	-13.68	37.85
	邵陵—花都	35.50	97.77
	迟营—花都	36.32	99.27
豫西断面	马寺—惠济	47.34	72.44
	马寺—嵩山 I	36.09	51.98
	马寺—嵩山 II	36.46	52.24
	汉都—武周	65.26	70.31
	嘉和—广成 I	50.48	80.20
	嘉和—广成 II	50.91	80.36

表2 河南省内短路电流裕度较小的 500 kV 母线

Table 2 500 kV buses with small short circuit current margin in Henan Province

母线名称	三相短路电流/kA	短路电流裕度指标/%
豫祥符	58.48	7.17
豫获嘉	56.59	10.17
豫邵陵	56.02	11.08
豫中换	54.65	13.25
豫官渡	54.01	14.27
豫花都	53.06	15.78
豫惠济	53.06	15.78
豫牡丹	53.06	15.78

故障清除后,系统不需要采取相应措施,频率、功角和电压就能恢复至允许范围内。表3给出了规划网架的弹性指标评估结果。

表3 河南省内 500 kV 母线电网弹性指标评估结果

Table 3 Grid resilience index evaluation of 500 kV buses in Henan Province

直流闭锁 类型	频率恢复		功角恢复	电压恢复
	速率/(Hz/s)	时间/s	时间/s	时间/s
天中直流单极	1.65	30	10.4	10.1
青豫直流单极	1.33	36	9.8	12.5
天中直流双极	1.82	37	10.8	10.6
青豫直流双极	1.88	42	11.1	11.6

4 河南省主网架承载能力提升方案

4.1 主网架加强方案

根据文3.2中各项指标的评估结果,河南省2025年规划网架特高压直流馈入总容量达到 $16\,000\text{ MW}$ ，“强直弱交”特征显现。其中,制约河南省“十四五”规划网架承载能力的最重要因素是输电线路潮流转移问题:天中直流双极闭锁后,豫中—豫南输电断面的姚孟至涂会 500 kV 线路可能出现过载,进而引发连锁停运风险。

为了保障豫中—豫南断面输电线路的潮流安全,避免直流闭锁后潮流转移带来线路过载问题,在2025年规划网架的基础上新建豫中东特高压交流站,增强现有特高压交流网架。如图5所示,新建驻马店至豫中东双回 $1\,000\text{ kV}$ 特高压线路,届时河南

省内形成“H”型特高压交流网架。豫中东特高压站送出500 kV线路4回,新建豫中东特高压至港区东变电站2回、至沙盟变电站1回、至庄周变电站1回。

豫中东特高压站建成后,河南主网架“强直弱交”矛盾减弱,豫中、豫南地区的电力接纳能力和电力跨地区转移能力得到进一步提升。

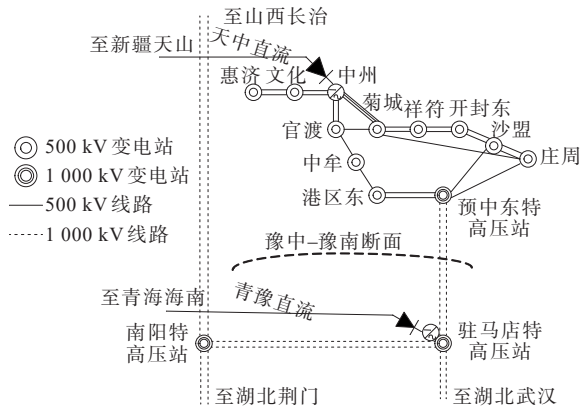


图5 豫中东特高压交流站示意

Figure 5 Schematic diagram of the UHV AC station in the Middle East of Henan

4.2 提升方案的承载能力分析

提升方案所对应的电网强度和弹性评估指标与新建豫中东特高压交流站前无明显变化,在本节不再重复列出。新建豫中东特高压站后的河南电网抗扰能力指标评估结果如下。

1) 新建豫中东特高压交流站后,无功功率在河南电网内转移能力提高,暂态电压稳定指标进一步改善。

2) 直流闭锁故障均未导致电网出现暂态失稳,功角稳定指标和频率指标与新建豫中东特高压交流站前无明显变化。

3) 主网架加强后,500 kV输电线路潮流安全裕度指标的结果如表4所示。可见,新建豫中东特高压站后减缓了豫中—豫南断面的潮流压力,重要输电线路潮流安全裕度均有所提高。其中,姚孟至涂会500 kV输电线路的潮流安全裕度由负值提高到24.58%,解决了天中直流双极闭锁后线路过载这一严重问题。

4) 计算新建豫中东特高压交流站后的短路电流,统计采用提升方案后短路电流裕度指标情况并与原方案进行对比,具体结果如表5、图6所示。可以看出,短路电流裕度指标整体得到了明显的提高,500 kV母线的三相短路电流得到降低。

表4 河南省内重要输电线路潮流安全裕度指标

Table 4 The power flow safety margin index for important transmission lines in Henan Province %

河南重要断面	500 kV 线路	潮流安全裕度指标			
		天中直流双极闭锁		青豫直流双极闭锁	
		原方案	提升方案	原方案	提升方案
豫北—豫中断面	惠济—获嘉 I	90.94	89.64	71.35	72.10
	惠济—获嘉 II	90.94	89.58	71.35	71.98
豫中—豫南断面	祥符—塔铺 I	66.15	67.71	86.15	85.74
	祥符—塔铺 II	66.15	67.86	86.15	85.80
豫西断面	嘉和—广成 I	50.48	71.54	80.20	71.62
	嘉和—广成 II	50.91	71.78	80.36	68.50
豫中—豫南断面	白河—武周	14.77	46.46	49.13	59.51
	姚孟—涂会	-13.68	24.58	37.85	72.13
豫南断面	邵陵—花都	35.50	64.43	97.77	89.85
	迟营—花都	36.32	62.71	99.27	89.93
豫西断面	马寺—惠济	47.34	54.82	72.44	93.02
	马寺—嵩山 I	36.09	51.31	51.98	88.46
豫西断面	马寺—嵩山 II	36.46	51.57	52.24	65.41
	汉都—武周	65.26	78.02	70.31	64.32
豫南断面	嘉和—广成 I	50.48	71.54	80.20	88.74
	嘉和—广成 II	50.91	71.78	80.36	88.67

表5 采用提升方案后短路电流裕度指标变化情况

Table 5 The change of short-circuit current margin index after adopting the promotion scheme

短路电流裕度/%	原方案母线数量	提升方案母线数量
0~10	1	0
10~20	13	7
20~30	15	15
30~40	12	11
40~50	13	11
50~100	2	12

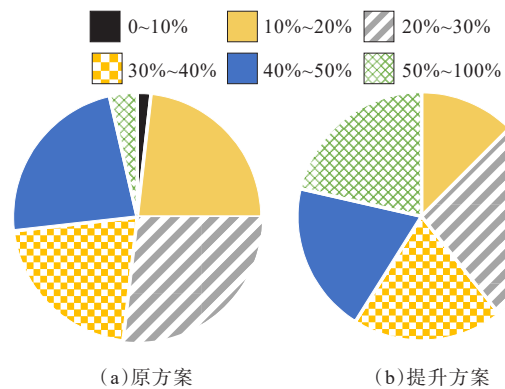


图6 2种方案短路电流裕度对比

Figure 6 Comparison of short-circuit current margins of the two schemes

5 结语

本文提出了一种适用于多回特高压直流馈入格局下受端电网主网架承载能力评估的指标体系,并基于河南电网规划网架展开了算例分析和应用,主要结论如下。

1) 所提出的受端电网主网架承载能力评估指标体系涵盖电网强度、抗扰能力、弹性水平3个方面,可综合分析主网架直流承载能力,揭示主网架在“强直弱交”形态下存在的薄弱环节。

2) 河南电网直流馈入规模扩大后,“强直弱交”特征凸显,天中直流双极闭锁后,重要输电通道可能发生过载现象、存在连锁停运风险。

3) 为解决现有规划网架可能出现的大容量直流故障后潮流转移安全问题,本文以构建“强直强交”受端电网为方向,给出新建豫中东特高压交流站的提升方案;提升方案的评估结果表明,新建豫中东特高压交流站可以解决天中直流双极闭锁后的交流线路过载问题,并且可以降低500 kV母线的三相短路电流水平。

所提出的评估指标体系可为受端电网主网架承载能力的评估提供理论和技术支持。在“碳达峰/碳中和”背景下,不仅受端电网馈入直流的规模将继续增加,煤电机组也会陆续关停,未来将继续研究常规电源空心化下的受端主网架承载能力评估模型和方法。此外,如何基于各类分项指标结果得到综合整体评价指标,也值得深入研究。

参考文献:

- [1] 唐俊,赵文强,侍乔明,等.混合级联特高压直流系统解/闭锁问题分析及对策[J].电力系统自动化,2023,47(16):171-180.
TANG Jun,ZHAO Wenqiang,SHI Qiaoming,et al.Analysis and countermeasures of deblocking/blocking problems in hybrid cascaded UHVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(16):171-180.
- [2] 樊艳芳,王永进.基于Hilbert能量幅值信息和波形信息的特高压直流输电线路单端保护方法[J].电工技术学报,2021,36(9):1818-1830.
FAN Yanfang,WANG Yongjin.Single-ended protection method for UHVDC transmission line based on Hilbert energy amplitude information and waveform information [J].Transactions of China Electrotechnical Society,2021,36(9):1818-1830.
- [3] 王骅,李相俊,李文启,等.分布式储能系统对特高压直流闭锁后的紧急功率支撑方法研究[J].供用电,2021,38(6):14-20.
WANG Hua,LI Xiangjun,LI Wenqi,et al. Research on emergency power support method of distributed energy storage system after UHVDC blockage[J]. Distribution & Utilization,2021,38(6):14-20.
- [4] 肖繁,王涛,高扬,等.基于特高压交直流混联电网的调相机无功补偿及快速响应机制研究[J].电力系统保护与控制,2019,47(17):93-100.
XIAO Fan,WANG Tao,GAO Yang,et al. Research on reactive power compensation and fast response mechanism of synchronous condenser based on UHVAC/DC hybrid grid[J]. Power System Protection and Control, 2019,47(17):93-100.
- [5] 邢伟,刘利,王健,等.华东电网特高压网架电压波动影响因素及波动率指标[J].电网与清洁能源,2021,37(4):73-79.
XING Wei,LIU Li,WANG Jian,et al. Influencing factors and assessment indexes of UHV grid voltage fluctuations in East China power grid[J]. Power System and Clean Energy,2021,37(4):73-79.
- [6] 覃琴,郭强,周勤勇,等.国网“十三五”规划电网面临的安全稳定问题及对策[J].中国电力,2015,48(1):25-32.
QIN Qin,GUO Qiang,ZHOU Qinyong,et al. The security and stability of power grids in 13th five-year planning and countermeasures[J].Electric Power,2015,48(1):25-32.
- [7] 文云峰,杨伟峰,林晓煌.低惯量电力系统频率稳定分析与控制研究综述及展望[J].电力自动化设备,2020,40(9):211-222.
WEN Yunfeng,YANG Weifeng,LIN Xiaohuang. Review and prospect of frequency stability analysis and control of low-inertia power systems[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(9):211-222.
- [8] 高凯,屈海涛,任茂鑫,等.基于可控电压源的高压直流输电换相失败抑制技术[J].高压电器,2023,59(1):49-57.
GAO Kai,QU Haitao,REN Maixin,et al. Commutation failure suppression technology for HVDC transmission based on controlled voltage source[J]. High Voltage Apparatus,2023,59(1):49-57.

- [9] XUE Y, ZHANG X P, YANG C H. Commutation failure elimination of LCC HVDC systems using thyristor-based controllable capacitors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 33(3): 1448-1458.
- [10] 朱瑞金. 含直流馈入的弱受端电网暂态电压稳定预防控制[J]. 电测与仪表, 2022, 59(3): 151-156.
- ZHU Ruijin. Transient voltage stability preventive control for weak receiving-end power grid with HVDC infeed[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(3): 151-156.
- [11] ZHANG F, XIN H H, WU D, et al. Assessing strength of multi-infeed LCC-HVDC systems using generalized short-circuit ratio[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 467-480.
- [12] LEE D H A. Voltage stability assessment using equivalent nodal analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 454-463.
- [13] LEE D H A, ANDERSSON G. An equivalent single-infeed model of multi-infeed HVDC systems for voltage and power stability analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 303-312.
- [14] 刘洪波, 阎禹同, 王曦, 等. 多馈入交直流混联系统小干扰稳定研究综述[J]. 发电技术, 2023, 44(4): 565-575.
- LIU Hongbo, YAN Yutong, WANG Xi, et al. A review of small signal stability studies of multi-infeed AC-DC hybrid system[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(4): 565-575.
- [15] 邱威, 贺静波, 谭真, 等. 一种用于含直流馈入的受端电网故障筛选与排序方法[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3516-3524.
- QIU Wei, HE Jingbo, TAN Zhen, et al. Contingency screening and ranking for receiving-end power grid with infeed HVDC[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3516-3524.
- [16] 赵晋泉, 汤建军, 吴迪, 等. 直流馈入受端电网暂态电压与频率稳定紧急协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(22): 45-53.
- ZHAO Jinquan, TANG Jianjun, WU Di, et al. Emergency coordination control strategy for transient voltage and transient frequency stability in HVDC infeed receiving-end power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22): 45-53.
- [17] 李兆伟, 翟海保, 刘福锁, 等. 华东大受端电网直流接入能力评估[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 147-152.
- LI Zhaowei, ZHAI Haibao, LIU Fusuo, et al. DC access capability evaluation for East China power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 147-152.
- [18] 戴志辉, 王靖宇, 潘星宇, 等. 特高压交直流接入后电网断面潮流综合评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 65-72.
- DAI Zhihui, WANG Jingyu, PAN Xingyu, et al. A comprehensive power flow evaluation method for a transmission section with UHVAC/DC integration[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 65-72.
- [19] CIGRE Working Group. IEEE guide for planning DC links terminating at AC locations having low short-circuit capacities[R]. New York: IEEE Press, 1997.
- [20] 牛宇昆, 文俊, 马立民, 等. 换相失败引起的送端电网暂态过电压抑制措施研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(11): 59-65+96.
- NIU Yukun, WEN Jun, MA Limin, et al. Transient overvoltage suppression measures for sending-end power grid caused by commutation failure[J]. Smart Power, 2021, 49(11): 59-65+96.
- [21] 薛禹胜. 运动稳定性量化理论: 非自治非线性多刚体系统的稳定性分析[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1999: 10-35.
- XUE Yusheng. Quantitative theory of motion stability: stability analysis of nonautonomous nonlinear multi-rigid body system[M]. Nanjing: Phoenix Science Press, 1999: 10-35.
- [22] 黄志光, 曹路, 李建华, 等. 混合多馈入直流作用下江苏受端电网安全稳定评估及改善[J]. 中国电力, 2021, 54(9): 55-65.
- HUANG Zhiguang, CAO Lu, LI Jianhua, et al. Evaluation and improvement of security and stability of Jiangsu receiving-end power grid with hybrid multi-infeed DC[J]. Electric Power, 2021, 54(9): 55-65.