

±1 100 kV 特高压直流输电受端接入方式的综合评估

沈郁¹,熊永新¹,姚伟¹,艾小猛¹,文劲宇¹,
张健²,屠竞哲²,曾兵²,郭贤珊³,付颖³

(1. 华中科技大学 电气与电子工程学院 强电磁工程与新技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074;

2. 中国电力科学研究院,北京 100192;3. 国家电网公司,北京 100031)

摘要:以±1 100 kV 特高压直流输电工程受端接入方式为评价对象,从潮流分布和安全稳定性2个方面提出了其评价指标体系,其中潮流分布指标包括潮流均匀度、线路负荷率、断面热稳定水平、特高压主变下网功率等,安全稳定性指标包括短路比、换相失败系数、功角严重度指标和故障摇摆严重度指标等。基于层次分析法和改进扇形雷达图法,提出了适用于±1 100 kV 特高压直流输电受端接入方式的综合评估方法,可用于定量评估不同接入方式的总体效果。

关键词:特高压直流;特高压输电;受端;接入方式;综合评价;层次分析法;雷达图法

中图分类号:TM 721.1;TM 723

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.08.028

0 引言

我国能源资源与负荷中心的不均衡分布形成了电能大规模远距离传输的迫切需求,特高压直流输电有利于大型能源基地的远距离大容量外送,在解决我国疆电外送、川电外送和藏电外送等问题中发挥重要作用^[1-2]。目前在建的准东—皖南±1 100 kV 特高压直流输电工程是国际上电压等级最高、容量最大、距离最远的输电工程,该工程将为实现更大范围内的资源优化配置创造有利条件^[3-4]。随着越来越多落点东中部电网的特高压直流输电工程的建成投运,东中部受端交流系统逐渐演变为多馈入直流接入系统^[5]。由于这些特高压直流工程大多采用电网换相换流器(LCC),需要受端交流电网提供足够的换相电压,当受端系统较弱时易引起换相失败,进而威胁受端电网的安全稳定^[6-7]。特高压直流输电受端接入方式对受端交流系统的强弱和其对直流系统的支撑能力将产生影响^[8],因此,研究特高压直流受端接入方式的影响将具有重要意义。

当前特高压直流受端接入方式可分为单层接入方式和分层接入方式2种。采用单层接入方式的特高压直流输电工程,其逆变站仅接入1个电压等级的交流系统中。而分层接入方式下的逆变站馈入的直流功率注入到2个不同电压等级的受端交流电网中。目前对这2种接入方式影响的定量分析主要围绕短路比指标展开,文献[8-10]计算得出分层接入方式下的直流落点侧的多馈入短路比高于单层接入方式下的多馈入短路比。但是,仅仅依靠短路比指标来衡量受端交流系统的强弱是不全面的,而且上

述文献对接入方式在潮流分布和安全稳定性等方面的其他影响分析主要为定性分析。为了更全面地评价准东±1 100 kV 直流输电受端接入方式的影响,需要考虑更多的量化指标,因此建立准东±1 100 kV 直流接入方式量化评估指标体系是十分必要的。

定量评估建立的量化评估指标体系涉及交直流系统的静态稳定性、暂态稳定性和经济性等各个方面,需要进一步进行全局性、整体性地综合评价。常用的综合评价方法包括基于层次分析法(AHP)、专家评价法、灰色关联理论、模糊数学理论和雷达图法等的评价方法^[11]。其中,层次分析法将指标分解成若干层次形成层次结构模型,并且赋予各个指标不同的权重,便于进行综合评价^[12];雷达图法的特点是简单直观,可以衡量评价对象的总体优势和各方面协调发展的情况^[13]。

本文首先建立了准东±1 100 kV 直流受端接入方式的评估指标体系,然后提出了基于层次分析法和改进扇形雷达图法的综合评价方法。针对所设计的±1 100 kV 直流受端可行接入方式,利用所提的评价指标体系和综合评价方法进行接入方式评估,最终确定了准东±1 100 kV 直流接入时受端适宜选择的接入方式。

1 ±1 100 kV 直流接入方式评价指标体系

±1 100 kV 直流输电工程接入方式的影响主要体现在潮流分布和安全稳定性这2个方面。首先,±1 100 kV 直流输电工程馈入受端交流系统的大量功率会改变受端的潮流分布。其次,基于LCC的换流站需要受端提供较多的无功功率支撑,受端电压支撑能力影响着系统暂态稳定性水平。因此,本文将从潮流分布和安全稳定水平这2个方面分别建立一系列评估指标,形成±1 100 kV 直流接入方式的评估指标体系。

收稿日期:2017-07-31;修回日期:2018-05-25

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900800)

Project supported by the National Key R&D Program of China (2016YFB0900800)

1.1 潮流分布评估指标

由于现有 1 000 kV 输电线路设计容量较大,因此本文中认为 1 000 kV 线路潮流分布均满足要求,不会出现功率越限的情况。因此,本文定义的潮流分布方面的评估指标,考虑的输电线路仅为受端电网中 500 kV 电压等级的主网架线路。

1.1.1 潮流均匀度指标

± 1 100 kV 直流输电工程的额定功率为 12 GW,面对大量直流功率馈入,选择受端接入方式时应尽可能使得直流落点附近的线路潮流均匀地扩散。为了描述直流落点近区线路潮流分布的均匀程度,定义潮流均匀度指标为 σ ,公式如下^[14]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n_e} \sum_{i=1}^{n_e} \left(\left| \frac{P_i}{P_{ui}} \right| - k_e \right)^2} \quad (1)$$

$$k_e = \frac{1}{n_e} \sum_{i=1}^{n_e} \left| \frac{P_i}{P_{ui}} \right|$$

其中, k_e 为直流落点一级断面的线路负荷率平均值; P_i 和 P_{ui} 分别为线路 i 实际传输功率和热稳定极限功率; n_e 为直流落点一级断面 500 kV 线路总数。

潮流均匀度指标本质上是标准离差率,该指标能有效反映直流落点附近潮流分布的均匀程度。指标值越小,说明直流落点出线上的潮流分布越均匀,接入方式选择得越适宜,反之则越不适宜。

1.1.2 线路负荷率指标

目前,我国东部地区出现的制约电网输电能力的主要因素是输电线路的热稳定约束。因此,需要考虑直流落点近区线路的负荷率情况,定义线路负荷率指标为 k_{LLR} ,公式如下:

$$k_{LLR} = \frac{1}{N_{LLR}} \sum_{i=1}^{N_{LLR}} \left| \frac{P_i}{P_{ui}} \right| + \sum_{i=1}^{N_{LLR}} D_i \quad (2)$$

$$D_i = \begin{cases} 1 & \frac{P_i}{P_{ui}} \geq 1 \\ 0 & \frac{P_i}{P_{ui}} < 1 \end{cases} \quad (3)$$

其中, N_{LLR} 为所关注直流落点近区线路总数; D_i 为惩罚函数,若线路 i 功率超过热稳定极限,则置 D_i 为 1,否则置为 0。若线路功率越限,通过惩罚函数在线路负荷率指标中引入一个较大的增量,则通过线路负荷率指标可以清晰地识别这一情况。

1.1.3 断面热稳定水平

电力系统输电断面对电网功率传输发挥着重要作用,断面线路的热稳定问题成为制约断面功率输送能力以及影响系统安全稳定运行的主要因素之一^[15]。根据《电力系统安全稳定导则》^[16]中的 $N-1$ 原则,断面热稳定约束可描述为:在给定的断面潮流约束下,断开该断面上任何一个输电线路,其余输电线路均不过载。

由于 ± 1 100 kV 直流输电落点安徽,本文中将输电断面选择为安徽外送输电断面,将断面热稳定水平定义为安徽外送断面任意一回线路断开后,断面其余线路的最大线路负荷率 k_{Ti} :

$$k_{Ti} = \max \frac{P'_i}{P_{ui}} \quad i = 1, 2, \dots, n_{Ti} \quad (4)$$

其中, n_{Ti} 为输电断面线路总数; P'_i 为输电断面开断一条线路后第 i 回输电线路上传输的稳态功率。

1.1.4 特高压主变下网功率

± 1 100 kV 直流输电工程受端的接入方式影响着注入受端电网 500 kV 和 1 000 kV 层级的功率,所需配备的特高压变压器的容量和对应的投资也不相同。因此定义特高压主变下网功率指标,能在一定程度上反映在不同接入方式的电网投资大小。定义特高压主变下网功率指标为 k_l ,公式如下:

$$k_l = \frac{\sum_{i=1}^{n_l} P_{Ti}}{S_B} \quad (5)$$

其中, P_{Ti} 为受端电网第 i 个 1 000 kV 特高压主变的下网功率; n_l 为特高压主变总数; S_B 为基准容量,设置为 10 000 MV·A。

1.2 安全稳定评估指标

1.2.1 多馈入短路比指标

多馈入短路比指标是当前使用最为广泛的多馈入交直流系统的强度衡量指标,它反映了直流间的相互作用及电网对换流母线的无功电压支撑能力大小,对系统电压稳定性具有一定表征作用,利用该指标能够直观初步地评估系统保持电压稳定的能力^[17]。

国际大电网会议多馈入直流系统研究工作组提出的多馈入直流短路比 MISCR (Multi-Infeed effective Short Circuit Ratio) 指标^[18]的定义为:

$$\text{MISCR}_i = \frac{S_{aci}}{P_{dNi} + \sum_{j=1, j \neq i}^{n_{MI}} \frac{\Delta U_j}{\Delta U_i} P_{dNj}} \quad (6)$$

其中, S_{aci} 为换流站 i 处的短路容量; P_{dNi} 和 P_{dNj} 分别为直流系统 i 和 j 的额定输送容量; n_{MI} 为多馈入交直流系统中所馈入的直流线路总数。换流母线 i 电压 U_i 变化 ΔU_i 时换流母线 j 的电压变化量为 ΔU_j 。

1.2.2 换相失败系数

由于晶闸管没有自关断能力,直流落点近区交流系统故障导致相电压减少可能引发直流系统换相失败,甚至直流闭锁和其他连锁故障。鉴于直流换相失败多源于逆变侧受端交流系统,且受交、直流系统之间的相互影响较大。而受端接入方式深刻影响受端系统,故探究接入方式对直流换相失败可能性的影响,是必要的。

定义换相失败系数 k_{CF} 表征直流落点近区线路发生 $N-1$ 和 $N-2$ 故障时,准东 ±1 100 kV 直流发生换相失败的可能性。需要注意的是,由于 ±1 100 kV 直流落点近区受端电网 500 kV 线路均为同杆并架双回输电线路, $N-1$ 指的是切除同杆并架双回输电线路中的 1 回, $N-2$ 指的是切除 2 回同杆并架输电线路。 k_{CF} 的计算公式如下:

$$k_{CF} = \frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} D_{1i} + \frac{1}{N_2} \sum_{i=1}^{N_2} D_{2i} \quad (7)$$

其中, N_1 和 N_2 分别为直流落点近区线路进行 $N-1$ 和 $N-2$ 故障校验的总次数; D_{1i} 和 D_{2i} 分别表示第 i 条线路发生 $N-1$ 和 $N-2$ 故障时是否发生换相失败,若出现换相失败,则置 D_{1i} 或 D_{2i} 为 1, 否则置为 0。值得注意的是,式(7)中 N_1 和 N_2 的取值并不相同。

1.2.3 功角严重度指标

交流系统的发电机相对功角在稳定运行时保持恒定,受到故障等扰动时,发电机的机械功率和电磁功率失去平衡,转子不再以同步转速旋转,各机组功角发生摇摆。若某些发电机间的相对角度不断增大直至超过 180° , 则将导致系统失去暂态稳定。功角暂态稳定的判别原则为:电网遭受每一次大扰动后,引起电力系统各机组之间功角相对增大,若系统内大机组之间的相对功角大于 180° , 则认为失步^[19]。

因此,为了量化分析不同接入方式下受端电网的功角稳定裕度,定义功角严重度指标 δ_{ang} 如式(8)所示。

$$\delta_{ang} = \begin{cases} \frac{\max(\theta_i - \theta_j)}{180^\circ} & \max(|\theta_i - \theta_j|) < \pi \\ 1 & \max(|\theta_i - \theta_j|) \geq \pi \end{cases} \quad (8)$$

其中, θ_i 和 θ_j 分别为发电机 i 和发电机 j 的功角。

1.2.4 故障摇摆严重度指标

运行经验表明,长距离互联电力系统的特高压联络线易遭受扰动,产生大幅度、长周期的功率摇摆^[20]。由于联络线功率摇摆峰值影响着系统的安全性,本文考虑利用这一指标来观察直流接入方式对受端系统暂态稳定性的影响。定义故障摇摆严重度指标为 k_{sw} , 公式如下:

$$k_{sw} = \frac{1}{N_{sw}} \sum_{i=1}^{N_{sw}} \frac{P_{maxi} - P_{ssi}}{P_{ssi}} \quad (9)$$

其中, N_{sw} 为所关注的联络线总数; P_{maxi} 为受扰后联络线 i 的功率摇摆峰值; P_{ssi} 为联络线 i 在故障后稳态运行功率。

最终建立的评价指标体系如图 1 所示,通过评估指标体系可以探究 ±1 100 kV 直流受端接入方式对系统潮流分布和安全稳定性的影响。

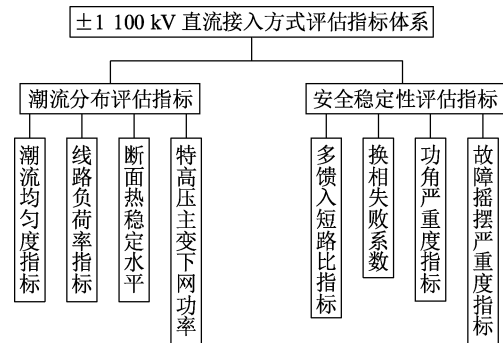


图 1 评估指标体系

Fig.1 Evaluation index system

2 基于层次分析法和改进扇形雷达图法的综合评价方法

综合评价中常利用层次分析法确定各指标的权重大小,而利用雷达图可以直观地表现评价对象的相对优缺点,改进扇形雷达图中每个指标的计算结果对应一个扇形。因此,本文首先根据层次分析法确定各个指标的权重,由此分配各扇形的夹角。然后对指标计算结果进行标准化处理后将其作为扇形半径,每个评价对象即可对应绘制一个扇形雷达图。最后通过提取扇形雷达图的面积和半径标准差这 2 个特征向量,构造综合评价函数,综合评价函数可以全面地反映评价对象的总体水平和各指标发展均衡程度。

2.1 由层次分析法确定指标权重

层次分析法是萨蒂等人于 20 世纪 70 年代提出的一种新型决策方法。它将实际问题分解为多个指标后对其进行层次化,形成有序的逐级层次结构。逐层对各指标的相对重要性进行比较,建立判断矩阵^[12,21]。若存在 N 个指标,则判断矩阵构造如式(10)所示。

$$A = (a_{ij})_{N \times N} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & \cdots & a_{NN} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, $a_{ij} = f(x_i, x_j)$ 为指标 x_i 和 x_j 之间的相对重要性的标度($i=j$ 时, $a_{ij} = 1$; $i \neq j$ 时, $a_{ji} = 1/a_{ij}$)。 $f(x_i, x_j)$ 采用成对比较法和 1—9 比较尺度确定,判断矩阵元素取值及含义如表 1 所示。

表 1 判断矩阵元素取值及含义

Table 1 Definitions and values of judgment matrix elements

x_i 相比 x_j 的重要性	a_{ij}	x_i 相比 x_j 的重要性	a_{ij}
相等	1	很重要	7
较重要	3	绝对重要	9
重要	5	介于相邻重要性两者之间	2, 4, 6, 8

需要利用一致性判据对判断矩阵做一致性校验,当一致性比率 $C_R < 0.1$ 时,说明判断矩阵构建合

理,否则需要调整判断矩阵使其满足一致性校验。定义一致性比率 C_R 如下:

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} \quad (11)$$

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n_{JM}}{n_{JM} - 1} \quad (12)$$

其中, $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征值; n_{JM} 为判断矩阵阶数; R_1 为平均随机一致性指标,它只与判断矩阵的阶数 n_{JM} 相关, n_{JM} 为 1—9 时,对应的 R_1 分别为 0、0、0.52、0.89、1.12、1.24、1.36、1.41、1.46。

一致性校验通过后,计算判断矩阵的最大特征向量,将其进行归一化处理后可得权重向量 $\mathbf{W}$ 。权重向量 $\mathbf{W}$ 反映了各个评价指标的重要程度。最后根据权重向量,相应地分配各个指标所形成的扇形夹角。

2.2 基于改进扇形雷达图的综合评价方法

雷达图法是一种典型的图像综合评价方法,具有形象直观的特点^[13]。若存在 N 个评价指标,则构造的含 N 个指标的改进扇形雷达图^[22]如图 2 所示。每一个评价对象均可以用一个改进扇形雷达图来表征。例如,若设计了 m 种接入方式,则对应可绘制 m 个扇形雷达图。

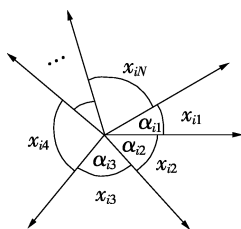


图 2 扇形雷达图

Fig.2 Sector radar chart

图 2 中,每个扇形的夹角 α_j 由层次分析法得到的权重向量确定,扇形夹角越大说明该指标重要程度越高,每个扇形半径 R_{ij} 表征归一化后的指标值。下面定义第 i 个评价对象的扇形雷达图的特征量为:

$$\begin{cases} S_i = \sum_{j=1}^N \pi R_{ij}^2 \frac{\alpha_j}{2\pi} = \sum_{j=1}^N \pi R_{ij}^2 W_j \\ \sigma_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (R_{ij} - \bar{R})^2} \end{cases} \quad (13)$$

其中, $\bar{R}$ 为扇形半径的平均值; S_i 为扇形面积和; σ_i 为扇形半径的标准差。 S_i 表示评价对象的总体水平, S_i 的值越大,表明评价对象的总体水平越高,反之越低; σ_i 表示评价对象各方面的发展均衡程度, σ_i 的值越小,表明评价对象的各指标越为均衡,反之越不均衡。 S_i 和 σ_i 的值不会随指标排列顺序不同而变化。

将特征向量作标准化处理后即可构造评价向量 $\mathbf{v}_i = [v_{i1}, v_{i2}]$, 其中 v_{i1} 为总体水平评价值, v_{i2} 为均衡度评价值。若共有 m 个评价对象,则评价向量的定义如下:

$$\begin{cases} v_{i1} = \frac{S_i}{\max \{ S_i \mid i=1, 2, \dots, m \}} \\ v_{i2} = \frac{\min \{ \sigma_i \mid i=1, 2, \dots, m \}}{\sigma_i} \end{cases} \quad (14)$$

v_{i1} 的值越大,表明该评价对象总体水平越高,反之越低; v_{i2} 的值越大,表明评价对象各方面发展程度越均衡,反之越差。

最终形成综合评价函数,对不同评价对象进行综合的评价考量,其定义为:

$$f(v_{i1}, v_{i2}) = \sqrt{v_{i1} v_{i2}} \quad (15)$$

3 综合评价流程

附录中图 A1 给出了 ± 1 100 kV 直流受端接入方式综合评价流程图。对可行接入方式进行综合评价时,根据建立淮东 ± 1 100 kV 直流接入方式的评价指标体系依次计算潮流分布和安全稳定水平指标值。然后对指标进行标准化处理并根据层次分析法确定指标权重,由此便确定了改进扇形雷达图的夹角和半径,随后提取扇形雷达图特征量、构造综合评价函数,以形成对接入方式的综合评价,并最终确定 ± 1 100 kV 直流工程接入交流系统时适宜的接入方式。

4 算例分析

本节首先对 ± 1 100 kV 直流受端可行的接入方式进行设计,然后以这些接入方式为评价对象进行分析。

4.1 受端可行接入方式

目前特高压直流受端接入方式主要分为单层和分层接入方式这 2 类。本文设计了 8 种 ± 1 100 kV 直流受端可行的接入方式,如附录中表 B1 所示。接入方式 3 和 4 中受端换流站单层接入 1 000 kV 等级交流电网,接入方式 5 和 6 中受端换流站单层接入 500 kV 等级交流电网,其余接入方式为分层接入方式。附录中图 B1 给出了接入方式 1 的示意图,该接入方式中 ± 1 100 kV 直流受端换流站落点皖南,受端换流站 500 kV 出线 6 回,双开断环接入 500 kV 繁昌—敬亭双回线路中并新增双回线路至芜三变电站;受端换流站 1 000 kV 出线 2 回,直接接入 1 000 kV 皖南特高压变电站。

4.2 接入方式评价指标权重分析

对于 ± 1 100 kV 直流接入方式的评价,本文已从潮流分布和安全稳定性 2 个方面建立了 8 个不同

的指标。根据评价指标构建原则和电力系统安全性、可靠性和经济性的要求,对各项指标进行重新归纳总结为3类一级指标,每一级指标由多个二级指标构成,如表2所示。

表2 接入方式的评价指标分类

Table 2 Classification of connection scheme indexes	
一级指标	二级指标
第一类	多馈入短路比指标 断面热稳定水平指标
第二类	换相失败系数 功角严重度指标 故障摇摆严重度指标
第三类	潮流均匀度指标 线路负荷率指标 特高压主变下网功率

首先,对与静态稳定性相关的第一类指标中的2项子指标进行对比,得到判断矩阵为:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix}$$

计算得到 $C_1 = 0$, 当 $n_{JM} = 2$ 时, $R_1 = 0$, 因此 $C_R = 0 < 0.1$, 满足一致性校验结果, 说明该判断矩阵合理。计算得到这2项子指标的权重向量为:

$$W_1 = \begin{bmatrix} 0.75 \\ 0.25 \end{bmatrix}$$

同样地, 设定与暂态稳定性相关的第二类指标和与经济性相关的第三类指标的判断矩阵分别为 A_2 和 A_3 。

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 7 \\ \frac{1}{3} & 1 & 3 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix}, A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 4 \\ \frac{1}{2} & 1 & 3 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix}$$

经检验2个判断矩阵均满足一致性校验。最终计算得到的第二类指标的各子指标的权重向量 $W_2 = [0.669\ 4 \quad 0.25 \quad 0.087\ 9]^T$, 第三类各子指标的权重向量 $W_3 = [0.558\ 4 \quad 0.319\ 6 \quad 0.012\ 2]^T$ 。

下面确定3类一级指标的判断矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 1 \\ \frac{1}{2} & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

计算得到 $C_1 = 0.026\ 8$, 当 $n_{JM} = 3$ 时, $R_1 = 0.52$, 因此 $C_R = 0.051\ 5 < 0.1$, 满足一致性校验结果。求得3类一级指标的权重向量 $W = [0.412\ 6 \quad 0.375\ 7 \quad 0.259\ 9]^T$ 。

最终得到8种接入方式下评价指标的权重向量及对应的扇形夹角如表3所示。

表3 指标权重及扇形夹角

Table 3 Weights of index and angles of sector		
指标	权重	扇形夹角/(°)
多馈入短路比指标	0.309 4	111.384
断面热稳定水平指标	0.103 1	37.116
换相失败系数	0.219 2	78.912
功角严重度指标	0.079 5	28.620
故障摇摆严重度指标	0.028 8	10.368
潮流均匀度指标	0.145 1	52.236
线路负荷率指标	0.083 1	29.916
特高压主变下网功率	0.031 7	11.412

4.3 不同接入方式指标值计算

本文仿真平台为 Windows 2007 XP 中文版 BPA 潮流及暂态稳定程序, 采用数据为国家电网十三五规划(2018年)冬季平峰运行方式下的数据, 直流模型采用基于 ABB 实际直流控制系统的 DA 准稳态模型^[10]。

计算得到不同接入方式下指标值如表4所示。需要说明的是, 由于潮流分布均匀度指标 σ 仅计及了 500 kV 电压等级的直流落点出线, 而方式3和4单层接入 1 000 kV 电压等级, 不含有 500 kV 出线, 因此表4第二列中, 将接入方式3和4中的 σ 值设定为0。

表4 不同接入方式评价指标值

Table 4 Evaluation indexes of different connection schemes									
方式	σ	k_{LLR}	k_{TI}	k_t	MISCR		k_{CF}	δ_{ang}	k_{sw}
					500 kV	1 000 kV			
1	0.056	0.299	0.99	0.623	3.629	3.192	0	0.260	0.217
2	0.184	0.392	0.82	0.648	5.383	3.959	0	0.254	0.279
3	0	0.238	0.49	1.047	—	2.010	1/2	0.328	1.031
4	0	0.241	0.50	1.057	—	2.506	1/4	0.501	0.904
5	0.135	3.471	1.74	0.196	1.814	—	1/6	0.254	0.136
6	0.185	0.409	1.25	0.158	3.088	—	0	0.316	0.086
7	0.137	0.342	0.77	0.604	3.862	3.095	0	0.241	0.287
8	0.099	0.283	0.94	0.620	4.648	3.169	0	0.237	0.257

由表4可知, 选择接入方式1时, 直流落点出线的潮流分布最为均匀, 馈入的直流功率最为均匀地扩散开; 由线路负荷率指标和断面热稳定水平可知, 采用接入方式5和6这2个单层接入 500 kV 电压等级的接入方式时, 会导致 500 kV 层级电网的潮流较重、输电断面的热稳定水平较低, 使得系统运行面临风险较大, 在故障或扰动情况下其线路上传输的有功功率有很大可能会超过其热稳定极限功率, 不利于受端电网的稳定性; 由特高压主变下网功率指标可知, 采用接入方式3和4时, 所需特高压主变的投资较大, 经济性不高; 由短路比指标可知, 采用分层接入方式的2个落点的短路比指标值均大于单层接入方式, 可见采用分层接入方式能提高受端系统的电压支撑能力, 有助于提高受端交流系统的电压稳定性; 从换相失败系数可知, 采用接入方式3—5时, 其直流落点近区交流系统故障引起直流换相失

败的可能性要高于其他接入方式;由功角严重度指标和故障摇摆严重度指标可知,采用接入方式 3 和 4 时,受端交流系统受到扰动后系统振荡较其他接入方式更严重。

4.4 不同接入方式综合评价

为了对接入方式进行综合分析,首先需对各项指标值进行标准化处理,使得所有指标值均在 0~1 之间。短路比指标为正指标,即短路比指标越高,说明系统强度和安全稳定水平越高;其余指标均为负指标。对正指标和负指标的标准化处理有所不同。设 a_i 为标准化处理之前的指标值, a'_i 为标准化处理之后的指标值。

对正指标的标准化处理公式为:

$$a'_i = \frac{a_i}{\max \{a_i | i=1, 2, \dots, m\}} \quad (16)$$

对负指标的标准化处理公式为:

$$a'_i = \frac{\min \{a_i | i=1, 2, \dots, m \text{ \& } a_i > 0\}}{a_i} \quad (17)$$

归一化处理后的指标值如表 5 所示。需要说明的是,由于单层接入方式下仅存在对应落点侧的单个多馈入短路比指标值,因此此处将分层接入方式的多馈入短路比处理为 2 层落点侧 2 个多馈入短路比指标值的平均值,单层接入方式下仍保持为对应落点侧的原有多馈入短路比。由于表 4 中方式 3 和方式 4 的 σ 指标值为 0,分母为 0 将导致标准化后指标值无穷大,而标准化处理后希望指标值在 0~1 之间,因此作特殊化处理,将表 5 中方式 3 和方式 4 的 σ 标准化处理后的指标值设定为 1。

表 5 标准化处理后不同接入方式评价指标值

Table 5 Standardize evaluation indexes of different connection schemes

方式	σ	k_{LLR}	k_{TI}	k_t	MISCR	k_{CF}	δ_{ang}	k_{sw}
1	1	0.796	0.495	0.254	0.806	1	0.911	0.396
2	0.306	0.607	0.597	0.244	1	1	0.933	0.308
3	1	1	1	0.151	0.507	0.02	0.722	0.083
4	1	0.987	0.98	0.149	0.632	0.04	0.473	0.045
5	0.418	0.068	0.281	0.804	0.458	0.06	0.933	0.632
6	0.304	0.582	0.392	1	0.779	1	0.75	1
7	0.410	0.696	0.636	0.262	0.781	1	0.983	0.299
8	0.567	0.841	0.521	0.255	0.800	1	1	0.334

将表 5 中标准化处理后的指标值作为扇形雷达图的半径,扇形图夹角见表 3。由此绘制每种接入方式的扇形雷达图,提取的扇形图特征量和总体评价值分别如图 3 和表 6 所示。

由图 3 可知,本文所研究的 8 种 ± 1100 kV 直流受端接入方式的综合排名如下:方式 1>方式 8>方式 2>方式 7>方式 6>方式 4>方式 3>方式 5。由表 6 可知,接入方式 1 具有最优的综合评价值,其面积评价值最高,说明该接入方式在所研究的接入方式中总

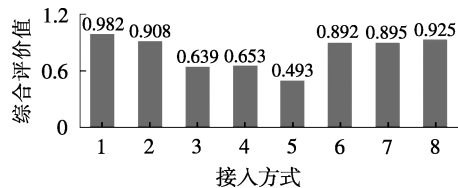


图 3 不同接入方式综合评价结果

Fig.3 Results of comprehensive evaluation with different connection schemes

表 6 接入方式总体评价值

Table 6 Comprehensive evaluation of different connection schemes

方式	面积评价值 v_{i1}	均衡度评价值 v_{i2}	总体评价值 f
1	1.000	0.965	0.982
2	0.955	0.863	0.908
3	0.633	0.645	0.639
4	0.653	0.652	0.653
5	0.281	0.866	0.493
6	0.796	1.000	0.892
7	0.833	0.962	0.895
8	0.888	0.963	0.925

体水平最高,并且接入方式 1 的指标均衡度也最高,说明其各项指标的发展最为均衡。因此接入方式 1 是所设计的可行接入方式中最优的接入方式。

4.5 ± 1100 kV 直流受端适宜选择的接入方式分析

根据图 3 给出的综合排名结果,排名前 4 的接入方式(方式 1、方式 8、方式 2 和方式 7)均为分层接入方式,体现了分层接入方式要优于单层接入方式,这一结论与多馈入短路比指标计算结果是一致的,采用分层接入方式时两侧落点的多馈入短路比指标均高于采用单层接入方式时对应侧落点的多馈入短路比。此外,通过对单一指标计算结果的分析,也可以发现分层接入方式相对于单层接入方式的优越性。例如,由线路负荷率指标值 k_{LLR} 可知,单层接入 500 kV 交流电网的接入方式 5 和方式 6 将使得直流落点近区的线路潮流较重,接入方式 5 中甚至出现了线路功率超过热稳定极限的情况。同样地,由断面热稳定水平值 k_{TI} 可知,方式 5 和方式 6 不满足断面热稳定约束。由特高压主变下网功率指标值 k_t 可知,单层接入 1000 kV 交流电网的接入方式 3 和方式 4,将大幅增加特高压主变的容量和投资成本。

在所设计的 4 种分层接入方式中,由潮流均匀度指标值 σ 可知,相比于其他分层接入方式,分层接入方式 1 中馈入受端的直流功率能最为均匀地扩散开。由故障摇摆严重度指标值 δ_{ang} 可知,接入方式 1 中系统受扰后联络线功率振荡幅度最小。此外,由综合评价结果可知,分层接入方式 1 具有最高的总体评价值,由指标分析结果可知其优越性主要体现在多馈入短路比、换相失败系数、潮流均匀度和故障

摇摆严重度等指标上。

因此,最终确定±1 100 kV 直流受端适宜选择的接入方式为附录中图 B1 所示的分层接入方式 1。需要说明的是,本文定义的各项指标权重并不唯一,若在实际设计或运行中需要着重考虑某方面因素,可以根据需要调整指标相对重要性,然后运用本文提出的接入方式评估方法对接入方式进行综合评估。因此本文提出的接入方式综合评估方法,可以实现直流受端接入方式综合评估和优选,具有一定的通用性。

5 结论

本文提出的±1 100 kV 特高压直流接入方式综合评估方法能有效评估直流受端接入方式的优缺点,为确定±1 100 kV 特高压直流受端接入时适宜选择的接入方式提供依据,得到的结论如下。

a. 为了定量全面地评价±1 100 kV 特高压直流受端接入方式的影响,本文从潮流分布和安全性 2 个方面入手建立了直流受端接入方式的评价指标体系。

b. 基于层次分析法和改进扇形雷达图法,提出了适用于±1 100 kV 特高压直流接入方式的综合评价方法,可以衡量不同接入方式的总体水平高低。

c. 根据指标值计算结果,发现分层接入方式相对于单层接入方式更具优越性,主要体现在短路比、潮流分布和经济性上。此外,分层接入方式下合理安排直流落点出线可以使直流落点附近潮流分布更为均匀,并且能提高受端交流系统的安全稳定水平。

d. 所提±1 100 kV 直流受端接入方式的量化评估指标体系和综合评估方法,是一种辅助决策手段,可以实现接入方式的综合评估和优选。该方法也是一种具有通用性的流程方法,可根据实际工程情况调整某方面因素的重要程度,也同样适用于±800 kV 等特高压直流输电工程,为其受端接入方式的选择提供理论依据。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 吴萍,徐式蕴,赵兵,等. 高压直流输电工程技术面向风火打捆的特高压直流输电工程弱送端强直弱交耦合特性研究[J]. 电力自动化设备,2016,36(1):60-66.
WU Ping, XU Shiyun, ZHAO Bing, et al. Research of weak sending-end coupling characteristics for bundled wind-thermal power transmission of UHVDC project[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 60-66.

[2] 付蓉,孙万钱,汤奕,等. 特高压直流分层接入方式下稳态特性研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):87-92.
FU Rong, SUN Wanqian, TANG Yi, et al. Steady-state characteristics of UHVDC hierarchical connection mode[J]. Electric Power Auto-

mation Equipment, 2017, 37(1): 87-92.

[3] 邓旭,王东举,沈扬,等. ±1 100 kV 特高压换流站直流操作过电压研究[J]. 电力自动化设备,2014,34(1):141-147.
DENG Xu, WANG Dongju, SHEN Yang, et al. DC switching over-voltage of ±1 100 kV UHVDC converter station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 141-147.

[4] 杨鹏,吴娅妮,马士聪,等. ±1 100 kV 特高压直流输电工程直流线路故障重启过程非故障极换相失败研究[J]. 电力自动化设备,2016,36(4):14-18.
YANG Peng, WU Yani, MA Shicong, et al. Analysis of commutation failure of healthy pole during restart of faulty line for ±1 100 kV UHVDC project[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 14-18.

[5] 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.

[6] 邵瑶,汤涌,郭小江,等. 2015 年特高压规划电网华北和华东地区多馈入直流输电系统的换相失败分析[J]. 电网技术,2011,35(10):9-15.
SHAO Yao, TANG Yong, GUO Xiaojiang, et al. Analysis on commutation failures in multi-infeed HVDC transmission systems in north China and east China power grids planned for UHV power grids in 2015[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 9-15.

[7] 李伟,肖湘宁,郭琦. 直流换相失败期间阀换相过程微观分析方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(3):115-119.
LI Wei, XIAO Xiangning, GUO Qi. Micro-analysis of valve commutation process during DC commutation failure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 115-119.

[8] 刘振亚,秦晓辉,赵良,等. 特高压直流分层接入方式在多馈入直流电网的应用研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(10):1-7.
LIU Zhenya, QIN Xiaohui, ZHAO Liang, et al. Study on the application of UHVDC hierarchical connection mode to multi-infeed HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 1-7.

[9] 汤奕,陈斌,皮景创,等. 特高压直流分层接入方式下受端交流系统接纳能力分析[J]. 中国电机工程学报,2016,36(7):1790-1800.
TANG Yi, CHEN Bin, PI Jingchuang, et al. Analysis on absorbing ability of receiving AC system for UHVDC hierarchical connection to AC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1790-1800.

[10] 王雅婷,张一弛,郭小江,等. ±1 100 kV 特高压直流送受端接入系统方案研究[J]. 电网技术,2016,40(7):1927-1933.
WANG Yating, ZHANG Yichi, GUO Xiaojiang, et al. A study on system connection schemes for ±1 100 kV UHVDC sending and receiving ends[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 1927-1933.

[11] 袁金晶,欧阳森,石怡理,等. 基于激励惩罚机制的区域电网电能质量综合评价方法[J]. 电力系统自动化,2013,37(7):55-59.
YUAN Jinjing, OUYANG Sen, SHI Yili, et al. Power quality comprehensive evaluation of regional power grid based on incentive and punishment mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(7): 55-59.

[12] 王钦,文福拴,刘敏,等. 基于模糊集理论和层次分析法的电力市场综合评价[J]. 电力系统自动化,2009,33(7):32-37.
WANG Qin, WEN Fushuan, LIU Min, et al. Combined use of fuzzy

- set theory and analytic hierarchy process for comprehensive assessment of electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(7): 32-37.
- [13] 王雁凌, 李艳君, 许奇超. 改进雷达图法在输变电工程综合评价中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 119-123.
WANG Yanling, LI Yanjun, XU Qichao. Application of improved radar chart in comprehensive evaluation of power transmission and transformation project[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 119-123.
- [14] 潘智俊, 张焰. 城市电网结构坚强性评价的指标体系和方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 3999-4005.
PAN Zhijun, ZHANG Yan. Index system and method for structure strength assessment of urban power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 3999-4005.
- [15] 赵娟, 申旭辉, 吴丽华, 等. 结合直流潮流模型的电网断面热稳定极限快速评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 97-101.
ZHAO Juan, SHEN Xuhui, WU Lihua, et al. Fast evaluation method on thermal stability limit of power grid crosssection with DC power flow model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 97-101.
- [16] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 电力系统安全稳定导则: DL 755—2001[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [17] 刘建, 李兴源, 傅孝韬, 等. 多馈入短路比及多馈入交互作用因子与换相失败的关系[J]. 电网技术, 2009, 33(12): 20-25.
LIU Jian, LI Xingyuan, FU Xiaotao, et al. Relationship of multi-infeed short circuit ratio and multi-infeed interaction factor with commutation failure[J]. Power System Technology, 2009, 33(12): 20-25.
- [18] B CIGRE Working Group. Systems with multiple DC infeed[R]. Paris, France: CIGRE, 2008.
- [19] 邵雅宁, 唐飞, 刘涤尘, 等. 一种适用于 WAMS 量测数据的系统暂态功角稳定评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 33-39.
SHAO Yaning, TANG Fei, LIU Dichen, et al. An approach of transient angle stability assessment in power system for WAMS measured data[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 33-39.
- [20] 汤蕾, 沈沉, 王志文, 等. 基于端口供给能量的特高压电网扰动冲击传播机理分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 824-831.
TANG Lei, SHEN Chen, WANG Zhiwen, et al. Mechanism of disturbance impact propagation in ultra-high voltage power system based on energy supply on port[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 824-831.
- [21] SAATY T L. The seven pillars of the analytic hierarchy process[J]. Multiple Criteria Decision Making in the New Millennium, 2001, 507: 15-37.
- [22] 陈勇, 陈潇凯, 李志远, 等. 具有评价结果唯一性特征的雷达图综合评价法[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(12): 1409-1412.
CHEN Yong, CHEN Xiaokai, LI Zhiyuan, et al. Method of radar chart comprehensive evaluation with uniqueness feature[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(12): 1409-1412.

作者简介:



沈 郁

沈 郁 (1992—), 女, 江苏南通人, 硕士研究生, 主要研究方向为特高压交直流电网稳定性分析与控制 (E-mail: yshen@hust.edu.cn);

熊永新 (1994—), 男, 江西丰城人, 博士研究生, 主要研究方向为特高压交直流稳定性分析与控制 (E-mail: yongxin_xiong@foxmail.com);

姚 伟 (1983—), 男, 湖北浠水人, 副教授, 博士, 通信作者, 主要研究方向为大电网稳定性分析与控制、柔性直流输电系统及其控制等 (E-mail: w.yao@hust.edu.cn)。

Comprehensive evaluation for receiving end connection scheme of ± 1 100 kV UHVDC power transmission

SHEN Yu¹, XIONG Yongxin¹, YAO Wei¹, AI Xiaomeng¹, WEN Jinyu¹,
ZHANG Jian², TU Jingzhe², ZENG Bing², GUO Xianshan³, FU Ying³

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

3. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China)

Abstract: To assess the receiving end connection scheme of ± 1 100 kV UHVDC (Ultra High Voltage Direct Voltage) project, an evaluation index system based on power flow distribution and system security and stability is established. The power flow distribution indexes contain the power flow evenness, line load rate, interface thermal stability level and UHV (Ultra High Voltage) transformer power, etc., while the system security and stability indexes contain the short circuit ratio, commutation failure rate, power angle severity index and power swing severity index, etc. Furthermore, based on the analytic hierarchy process and radar chart, a comprehensive evaluation method for the receiving end connection scheme of ± 1 100 kV UHVDC project is proposed, which can quantitatively evaluate the overall impacts of different connection schemes.

Key words: UHVDC; UHV power transmission; receiving end; connection scheme; comprehensive evaluation; analytic hierarchy process; radar chart method

附录

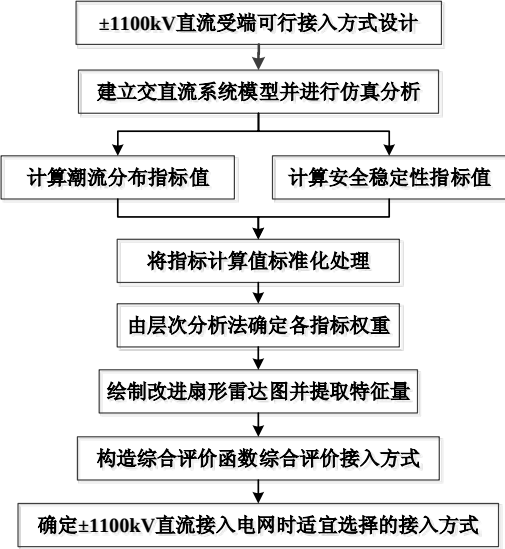


图 A1 ±1100kV 直流受端接入方式综合评价流程图

Fig. A1 Flowchart of comprehensive evaluation of connection scheme for ±1100kV UHVDC project

表 B1 评价对象：±1100kV 受端可行的接入方式

Table B1 Evaluation object: possible connection schemes of ±1100kV UHVDC receiving end								
方式 编号	1	2	3	4	5	6	7	8
接入方式类 型	分层	分层	单层	单层	单层	单层	分层	分层
500kV 出线数	6	6	0	0	6	10	6	8
接至 500kV 变电站	芜三 繁昌 敬亭	文都 肥二 福渡	无	无	芜三 繁昌 敬亭	芜三 繁昌 敬亭 福渡 楚城	皖南特 繁昌 敬亭	芜三 繁昌 敬亭 福渡
1000kV 出线 数	2	4	2	4	0	0	2	2
接至 1000kV 变电站	皖南特	皖南特 淮南特	皖南特	皖南特 淮南特	无	无	皖南特	皖南特

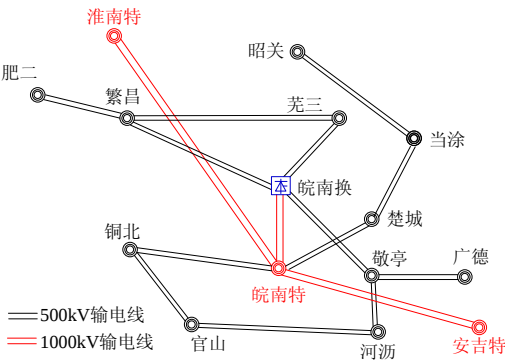


图 B1 ±1100kV 直流受端可行接入方式 1

Fig. B1 Feasible connection scheme of receiving end of ±1100kV UHVDC