

多馈入直流系统的特高压直流接入方式优选方法

徐 箭¹,张华坤¹,孙 涛¹,王 甜¹,蒋一博¹,林常青²

(1. 武汉大学 电气工程学院,湖北 武汉 430072;2. 国网湖北省电力公司,湖北 武汉 430077)

摘要: 研究并建立了评估多馈入直流系统的特高压直流接入方式的评价指标体系,以全面评估网损、静态安全稳定、多馈入短路比等因素对接入方式的影响。提出了基于最优组合权重的多馈入直流系统的特高压直流接入方式优选方法,基于主客观加权属性值一致化建立了求取最优组合权重的优化模型。在此基础上,以相对贴近度指标来量化评估各备选方案,从而实现优选决策。最后,将该方法应用于蒙西—武汉特高压直流接入华中电网的方式优选决策中,得到了分层接入方式最优的结论。

关键词: 多馈入; 直流系统; 特高压直流输电; 接入方式; 最优组合赋权; 评估; 相对贴近度; 优化

中图分类号: TM 72;TM 715⁺³

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.06.009

0 引言

随着晋东南—南阳—荆门 1000 kV 特高压交流试验工程以及 ±800 kV 向家坝—上海特高压直流工程的成功投运和安全稳定运行,我国进入了特高压交直流快速发展的新阶段。我国电网逐渐形成了交直流混联的格局,特别是华中、华东等受端电网将形成多回直流馈入特高压交流电网的运行方式,使得电网运行方式更加多样,电源安排更加灵活,对我国的能源资源优化配置具有重大作用。

多回直流馈入特高压交流电网使电网的结构更复杂,引起了一系列稳定性问题^[1-2]:单个交流故障或直流故障有可能引发多回直流相继出现换相失败,严重时甚至会导致直流闭锁;直流一旦出现换相失败,在功率恢复过程中,需要交流系统提供大量的无功功率以确保足够的换相电压;多馈入直流系统还会使受端电网结构更加密集,加重受端的潮流和短路电流水平^[3-7]。选择合适的直流落点和接入方式可减弱这些影响,使电网运行得更加安全、可靠、经济。

文献[8]兼顾交直流系统的稳定性和经济性,以线性加权法对单直流落点问题进行了研究;文献[9]以多馈入短路比为基础,通过建立整体性、均衡性、干扰性和安全裕度为指标的评价体系,采用二项加权系数法确立了多直流落点选择的方案;文献[10]定义了反映直流在交直流影响中的权重,基于多馈入短路比,对多馈入直流落点问题进行了研究。但是,这些研究都没有涉及特高压直流的接入方式问题。随着特高压交流网架的逐步建立,特高压直流接入交流电网的方式将有更多选择。目前对于特高压直流接入方式的研究还比较少,文献[11]从理论

上分析了不同的特高压直流接入方式对多馈入短路比的影响,给出了特高压直流接入方式的参考,但是忽略了接入方式对其他指标的影响。

特高压直流接入方式的选择由受端电网的网架结构、安全稳定水平、经济性等多目标共同决定,各目标间的性质和量纲不同而无法统一比较,因此特高压直流接入方式优选属于典型的多目标决策 MODM (Multiple Objective Decision Making) 问题。MODM 的求解有层次分析法、模糊优选^[12-14]等。在求解的过程中,合理赋予权重是优选的关键。为了克服传统的只考虑主观权重而对主观经验依赖性较强或者只考虑客观权重而对数据依赖性较强的缺陷,近年来提出了考虑主客观权重的组合赋权方法^[15-17],但在组合系数的选取方面缺乏合理有效的方法。

本文不涉及特高压直流落点选择问题,仅对落点区域存在特高压交流变电站情况下直流的接入方式问题进行研究。文中首先建立了适用于多馈入直流系统的特高压直流接入方式的评价指标体系,该指标体系从网损、静态安全性、多馈入短路比等多个方面对特高压直流接入方式进行评价;然后分析了 G1 法和熵权法确定主客观权重的方法,并以主客观加权属性值一致化为目标求取了最优组合权重;在此基础上,以相对贴近度对特高压直流接入方案进行了优选;最后将该方法运用于“十三五”期间蒙西—武汉特高压直流接入方式的优选决策案例。

1 评价指标体系

1.1 评价指标选取原则

合理选择评价指标体系是正确决策的前提条件。因此在建立多馈入直流系统特高压直流接入方式评价指标体系时,指标选取应遵循一定的原则。

a. 系统性。评价指标体系要能从各个角度系统地反映不同直流接入方式对系统运行特性的影响。

收稿日期:2014-12-22;修回日期:2015-04-13

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2012CB215201)

Project supported by the National Basic Research Program of China(973 Program)(2012CB215201)

b. 可量化性。应尽量选取能够量化或模糊量化的指标,便于优选。

c. 典型性。应能够突出重点,把握问题的主要方面,同时评价指标间要有差异性和可比性。

在构建评价指标体系之前,首先要确定核心评价指标。核心评价指标的选取应该在遵循上述原则的前提下,突出问题的主要方面,并且易于计算分析。结合以上多馈入直流系统特高压直流接入方式的特点和目的,本文主要从经济性、安全性以及远景适应性 3 个方面选取了核心评价指标,构建了包含网损、静态安全、多馈入短路比、断面传输功率极限以及交流故障极限切除时间暂态稳定性指标的多馈入直流系统特高压直流接入方式的评价指标体系。

1.2 网损指标

网损反映特高压直流不同接入方案的运行成本,是经济性的重要指标。一般以式(1)进行计算。

$$\Delta P_{\text{Loss}}=P_{\text{G}}-P_{\text{LD}} \tag{1}$$

其中, P_{G} 为所考察电网区域的总发电功率; P_{LD} 为所考察区域的总负荷功率。实际计算中,直接根据网络拓扑结构和运行方式,考察区域内的潮流水平,求取网络损耗。

1.3 静态安全性指标

静态安全性是指系统中线路、变压器等设备因故退出运行时电网设备的过载程度。静态安全性指标从潮流的角度反映了电网的安全供电能力。特高压直流不同接入方式下,网络内的潮流分布会发生变化,潮流过重会存在静态安全风险。当系统发生“N-1”故障时,可能导致部分线路功率超过其热稳极限。为了考核不同接入方案下的静态安全性,定义静态“N-1”安全性指标如式(2)和式(3)所示。

$$I_{\text{pfo}}(1_r)=\begin{cases} 0 & P_r<0.8P_{r\text{max}} \\ P_r/P_{r\text{max}} & P_r\geq 0.8P_{r\text{max}} \end{cases} \tag{2}$$

$$I_{\text{pfo}}=\sum_{i=1}^{n_{\text{pf}}} I_{\text{pfo}}(1_r) \tag{3}$$

其中, $I_{\text{pfo}}(1_r)$ 为静态“N-1”故障下第 r 条线路静态安全值; P_r 为第 r 条考核线路在静态“N-1”下的功率; $P_{r\text{max}}$ 为第 r 条考核线路的热稳极限; n_{pf} 为考核线路总数; I_{pfo} 为特高压直流不同馈入下的静态安全系数值。静态安全系数值越大,说明静态“N-1”下线路过载程度越大,静态安全裕度越小,静态安全性越差。

1.4 多馈入短路比指标

基于多端口戴维南等值的多馈入直流系统简化模型如图 1 所示。

多馈入短路比指标反映了受端交流电网对多馈入直流的电压支撑能力,可以用来衡量多馈入直流系统的电压稳定性^[18]。交流系统对直流系统的电压支撑能力主要取决于受端交流系统与所连直流系统

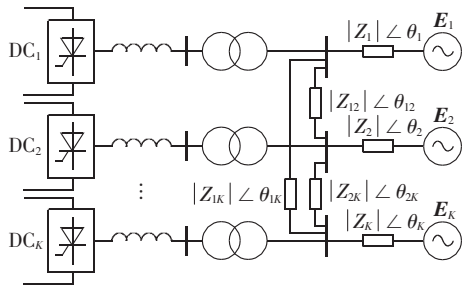


图 1 多馈入直流等值系统
Fig.1 Equivalent multi-ifeed DC system

的容量的相对大小,即短路比指标^[5,7,19]。然而传统的短路比指标没有考虑多回直流之间的相互影响,所得结果往往偏于乐观。为了克服这个缺陷,2007 年国际大电网会议(CIGRE)提出了多馈入短路比的概念^[20]。其表达式如下:

$$M_i=\frac{S_{\text{aci}}}{P_{\text{di}}+\sum_{j=1,j\neq i}^K M_{\text{ifji}}P_{\text{dj}}}=\frac{S_{\text{aci}}}{P_{\text{di}}+\sum_{j=1,j\neq i}^K \frac{\Delta U_j}{\Delta U_i}P_{\text{dj}}} \tag{4}$$

其中, M_i 为第 i 回直流所对应的多馈入短路比; S_{aci} 为第 i 回直流线路逆变侧母线的短路容量; P_{di} 、 P_{dj} 分别为第 i 、 j 回直流线路所传输的有功功率, M_{ifji} 为直流线路相互影响因子,其定义为当换流母线 i 投入小容量的三相对称电抗器或电容器导致换流母线 j 电压变化 ΔU_j 与换流母线 i 电压变化 ΔU_i 的比值。

单回直流线路分层接入 1 000 kV 及 500 kV 交流电网方式如图 2 所示^[11]。对于分层接入方式,多馈入短路比同样适用,只是要分别求取单回直流线路所对应的 2 个换流母线的多馈入短路比。 K 回分层接入方式的直流线路就对应 $2K$ 个多馈入短路比值。

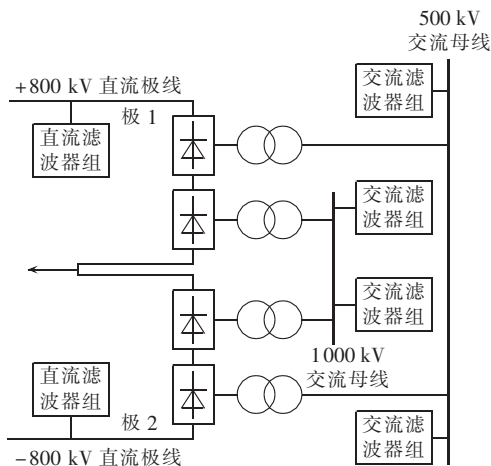


图 2 特高压直流分层接入方式
Fig.2 Hierarchical UHVDC connection mode to AC

1.5 断面传输功率极限指标

断面传输功率极限指标反映了不同接入方式下特高压直流断面的可利用程度。断面输送功率极限越大,说明特高压直流断面的可利用程度越高,输送

功率能力越强,断面抗干扰能力也越强,同时满足未来经济发展需要的传输裕度也越大。

本文定义断面传输功率极限指标值为:

$$P_{\text{TSL}} = P_{\text{lim}} - P_0 \quad (5)$$

其中, P_{lim} 为考虑系统静态和稳定性约束的特高压直流传输功率的极限值,可以用连续潮流算法计算得出; P_0 为特高压直流规划初始传输功率。

1.6 交流故障极限切除时间暂态稳定性指标

交流故障极限切除时间可以作为衡量多馈入直流系统暂态稳定性的重要指标。特高压直流接入区域附近重要母线出现三相短路故障时,会导致直流线路逆变侧换流母线电压下降,当其低于某一个值时,直流系统会出现换相失败,故障持续时间较长还会导致换流器因连续的换相失败而闭锁。直流线路闭锁会导致交直流系统损失较多有功,进而威胁系统安全稳定运行。交流故障极限切除时间值越大,多馈入直流系统抵御严重暂态故障的能力越强,暂态稳定性越好。

本文定义特高压直流不同接入方式下交流故障极限切除时间暂态稳定性指标 t_{MDC} 为:

$$t_{\text{MDC}} = \frac{1}{N_F} \sum_{i=1}^{N_F} t_{\text{MDC},i} \quad (6)$$

其中, N_F 为考察的特高压落点附近的故障母线总数; $t_{\text{MDC},i}$ 为母线 i 三相短路故障时能保持系统稳定的极限切除时间。

本文建立了多馈入直流系统特高压直流接入方式评价指标体系,具体为:网损指标 I,静态安全性指标 II,多馈入短路比指标 III,断面传输功率极限指标 IV,交流故障极限切除时间暂态稳定性指标 V。其中,指标 I、II 为越小越优型指标,指标 III、IV、V 为越大越优型指标。

2 基于主客观最优组合赋权的优选方法

2.1 评价指标的规格化矩阵

设多目标系统是由 n 个方案组成的决策集,评价指标个数为 m ,可以形成方案决策矩阵如下:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} = [x_{ij}]_{m \times n} \quad (7)$$

其中, $i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n; x_{ij}$ 为决策方案 j 指标 i 的值。

由于各评价指标之间存在量纲和级别上的差异,为了消除量纲和级别带来的不可公度性,决策之前首先将评价指标进行规格化处理^[21]。

在优选决策过程中,取第 i 个评价指标的最大值与最小值分别作为上、下界限的相对值,引入相对优属度。其中,最大值为 $x_{\text{imax}} = \max(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$,最小

值为 $x_{\text{imin}} = \min(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ 。

对于越大越优型评价指标,其相对优属度为:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{\text{imax}}} \quad (8)$$

对于越小越优型评价指标,其相对优属度为:

$$r_{ij} = \frac{x_{\text{imin}}}{x_{ij}} \quad (9)$$

由式(8)、(9)可得多目标决策的规格化矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} = [r_{ij}]_{m \times n} \quad (10)$$

2.2 基于主客观加权属性值一致化的组合赋权

由于每个决策指标的重要性往往不同,需要为每个评价指标确定一个权值来代表其对决策方案的影响程度,权值的科学合理性会直接影响优选的结果,因此权值的确定非常关键。为了使权值既能反映决策者的主观愿望,又能体现决策的客观性,本文采用 G1 法确定主观权重,熵权法确定客观权重,并以主客观加权属性值一致化为目标求取主观权重和客观权重的加权系数,进而得到组合权重。

2.2.1 G1 法主观赋权

设评价指标集为 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$, G1 法通过逐次从 D 中选取最不重要指标,进而可唯一得到评价指标之间重要性的排序 $d_1^* > d_2^* > \dots > d_m^*$,可以有效避免传统的层次分析法一致性检验错误的缺陷,同时对元素的个数没有限制,具有保序性^[22]。

为书写方便且不失一般性,把重要性排序仍记为 $d_1 > d_2 > \dots > d_m$ 。

专家关于评价指标 d_{k-1} 与 d_k 的重要性程度之比 ω_{k-1}/ω_k 的理性判断可以表示为:

$$\omega_{k-1}/\omega_k = r_k \quad k = m, m-1, \dots, 2 \quad (11)$$

其中, ω_k 为评价指标 d_k 的权重。

指标数量较大时,可以取最不重要的指标 $r_m = 1$,为了使二元定量对比中 r_k 更易于按我国的语言习惯给出定量标度,建立语气算子与定量标度之间的对应关系,如表 1 所示。一般情况下,最多需 9 个标度来区分事物之间质的差别或重要性程度的不同。

表 1 语气算子与定量标度的对应关系
Table 1 Corresponding relation between mood operator and quantitative scale

r_k	语气算子说明
1.0	指标 d_{k-1} 与指标 d_k 具有同样重要性
1.1	指标 d_{k-1} 与指标 d_k 之比介于同样重要和稍微重要之间
1.2	指标 d_{k-1} 比指标 d_k 稍微重要
1.3	指标 d_{k-1} 与指标 d_k 之比介于稍微重要和明显重要之间
1.4	指标 d_{k-1} 比指标 d_k 明显重要
1.5	指标 d_{k-1} 与指标 d_k 之比介于明显重要和强烈重要之间
1.6	指标 d_{k-1} 比指标 d_k 强烈重要
1.7	指标 d_{k-1} 与指标 d_k 之比介于强烈重要和极端重要之间
1.8	指标 d_{k-1} 比指标 d_k 极端重要

在给出 r_k 的值之后,可确定指标的权重为:

$$\omega_m = \left(1 + \sum_{k=2}^m \prod_{i=k}^m r_i \right)^{-1} \quad (12)$$

$\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m]$ 即为指标的权向量。

2.2.2 熵权法客观赋权

在评价指标中所获得客观信息的多少,是评价精确和可靠的重要因素。熵是数据所含有有效信息的度量。通过熵来确定权重,就是根据各项评价指标值之间的差异程度,来确定各评价指标的权重^[23]。

针对含 m 个评价指标的 n 个决策方案的决策问题,第 i 个评价指标的熵定义为:

$$H_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \quad (13)$$

其中 $f_{ij} = r_{ij} / \sum_{j=1}^n r_{ij}; i=1, 2, \dots, m$ 。

第 i 个评价指标的熵权 ω_i 定义为:

$$\omega_i = \frac{1 - H_i}{m - \sum_{i=1}^m H_i} \quad (14)$$

其中, $0 \leq \omega_i \leq 1$, 且 $\sum_{i=1}^m \omega_i = 1$ 。

从以上定义可以推出,决策方案的同一评价指标值相差越大,则熵值越小,熵权越大,表明该评价指标给决策者提供的有用信息越多;反之,决策方案的同一指标值相差越小,则熵值越大,熵权越小,该评价指标给决策者提供的有用信息越小。特别地,当评价指标值相等时,该项指标熵值为 1,熵权为 0,表明不提供任何决策有用信息,可以剔除。因此,熵权的大小并不是决策问题中评价指标真正意义上的重要性系数,它代表的是该评价指标在决策问题中所提供有效信息量的多寡程度,是主要依赖客观数据的客观评价方法。

2.2.3 基于主客观加权属性值一致化的组合赋权

在多目标决策方案中,各方案的优劣排序主要是由加权属性值决定。为了使主观信息和客观信息在方案排序中都能得到充分体现,本文建立了由主观权重确定的加权属性值与客观权重确定的加权属性值一致化的优化模型^[24]。

假设由 G1 法和熵权法得到的权重分别为 $\omega' = [\omega'_1, \omega'_2, \dots, \omega'_m]$ 、 $\omega'' = [\omega''_1, \omega''_2, \dots, \omega''_m]$, 组合权重系数分别为 α, β , 其中, $\alpha, \beta \geq 0, \alpha + \beta = 1$, 则组合权重为:

$$\omega = \alpha \omega' + \beta \omega'' \quad (15)$$

方案 j 评价指标 i 的加权属性值分别为 $\alpha \omega'_i r_{ij}$ 、 $\beta \omega''_i r_{ij}$, 则方案 j 的主客观属性值偏离程度为:

$$Z_j = \sum_{i=1}^m (\alpha \omega'_i r_{ij} - \beta \omega''_i r_{ij})^2 \quad (16)$$

为了使主客观加权属性值趋于一致,可建立优化模型如下:

$$\min Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_n) \quad (17)$$

由于各个方案之间是公平竞争关系,利用线性加权法可以把式(17)等价为如下模型:

$$\begin{cases} \min Z = \sum_{j=1}^n Z_j = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (\alpha \omega'_i r_{ij} - \beta \omega''_i r_{ij})^2 \\ \text{s.t. } \alpha + \beta = 1, \alpha, \beta \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

通过对上述模型(18)进行求解,可求得评价指标主客观权重的加权系数。

2.3 基于相对贴近度的决策方案优选

在求取组合权重 $\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m]$ 之后,可求得加权属性矩阵 G :

$$G = [g_{ij}]_{m \times n} = [\omega_i r_{ij}]_{m \times n} \quad (19)$$

加权属性矩阵的理想点 P^* 和负理想点 P^- 分别为 $P^* = [p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_m]$ 、 $P^- = [0, 0, \dots, 0, \dots, 0]$, 其中, $p_i = \max_j \{g_{ij} | j=1, 2, \dots, n; i=1, 2, \dots, m\}$ 。

定义 $G_j = [g_{1j}, g_{2j}, \dots, g_{mj}]$, 则各决策方案相对理想点的贴近度 T_j 为:

$$T_j = \frac{(P^* - G_j)(P^* - P^-)^T}{\|P^* - P^-\|} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m g_{ij} p_i}{\sum_{i=1}^m p_i^2} \quad (20)$$

根据各方案算出的 T_j 值进行优选排序, T_j 值越小则越优。

至此,本文建立了多馈入直流系统的特高压直流接入方式的评价指标体系以及最优组合赋权的优选方法,具体优选决策流程如图 3 所示。

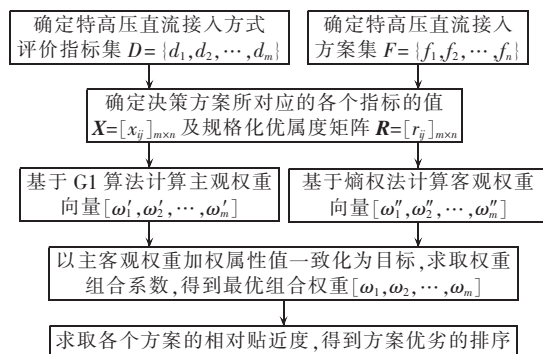


图 3 多馈入直流系统的特高压直流接入方式优选流程
Fig.3 Flowchart of optimal connection mode selection of UHVDC to multi-infeed DC system

3 算例分析

华中电网作为我国主要的受端电网之一,需要接受大量外来电力。根据国家电网公司规划,“十三五”期间,华中电网将形成南阳—荆门—长沙、驻马店—武汉—南昌、万县—荆门—武汉的特高压交流网架,同时馈入直流线路 5 回,其中高压直流线路 2 回,特高压直流线路 3 回,构成了一个多馈入直流的系统。同时,为了满足蒙西风电外送以及鄂东经济发展的需要,蒙鄂 ± 800 kV 特高压直流将落点武汉,

输送功率 8 000 MW。根据规划,特高压直流接入受端电网的方案有 3 种,即接入 500 kV 交流网架,分层接入 500 kV 和 1 000 kV 交流网架,以及接入 1 000 kV 交流网架,如图 4 所示。

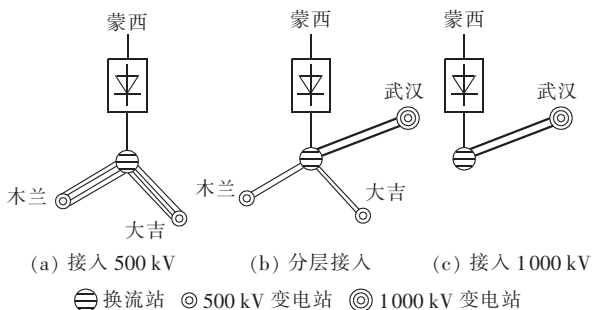


图 4 蒙西—武汉特高压直流不同接入方式
Fig.4 Different connection modes of West Mongolia-Wuhan UHVDC

将本文所提的多馈入直流系统特高压直流接入方式评价指标体系和优选方法应用到蒙西—武汉特高压直流接入方式选取中,可以确定 $m=5,n=3$ 。

基于 PSASP6.282 建立蒙西—武汉特高压直流接入方式的 3 种仿真计算模型。各优选决策方案的网损指标 I、静态安全性指标 II、多馈入短路比指标 III、断面传输功率极限指标 IV、交流故障极限切除时间暂态稳定性指标 V 值如表 2 所示。其中分层接入方式多馈入短路比取 500 kV 换流母线和 1 000 kV 换流母线多馈入短路比的平均值。

表 2 不同接入方案的指标值计算结果

Table 2 Calculated indexes for different connection modes

接入方式	指标 I / MW	指标 II	指标 III	指标 IV / MW	指标 V / s
接入 500 kV	976.5	2.572	3.99	7 000	0.203
分层接入	966.5	0	6.17	6 000	0.221
接入 1 000 kV	1 075.8	0	4.53	6 000	0.247

将指标值规格化处理后可得接入方式目标优属度矩阵为:

$$R=\begin{bmatrix} 0.9898 & 1.0000 & 0.8993 \\ 0 & 1.0000 & 1.0000 \\ 0.6467 & 1.0000 & 0.7342 \\ 1.0000 & 0.8571 & 0.8571 \\ 0.8220 & 0.8947 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

3.1 组合权重的计算

根据多馈入直流系统特高压直流接入对电网的影响,可以确定评价指标的重要性排序为多馈入短路比指标 III>静态安全性指标 II>交流故障极限切除时间暂态稳定性指标 V>网损指标 I>断面传输功率极限指标 IV。结合 G1 法比较指标间的重要性,可得评价指标的主观权重向量为 $\omega'=[0.137\ 6\ 0.231\ 2\ 0.323\ 7\ 0.114\ 7\ 0.192\ 7]$,由式(13)、(14)可得基于熵权法的评价指标的客观权重向量为 $\omega''=[0.002\ 6$

0.9428 0.0406 0.0064 0.0077]。

解模型式(18)可得主客观权重组合系数分别为 $\alpha=0.7015,\beta=0.2985$,于是可求得组合权重向量为 $\omega=[0.0973\ 0.4436\ 0.2392\ 0.0824\ 0.1375]$ 。

3.2 决策方案的相对贴近度

基于组合权重向量和优属度矩阵可求得加权属性矩阵为:

$$G=\begin{bmatrix} 0.0963 & 0.0973 & 0.0875 \\ 0 & 0.4436 & 0.4436 \\ 0.1547 & 0.2392 & 0.1756 \\ 0.0824 & 0.0706 & 0.0706 \\ 0.1130 & 0.1230 & 0.1375 \end{bmatrix}$$

对 3 个决策方案分别求其对理想点的相对贴近度,可得 $T_1=0.7624,T_2=0.0103,T_3=0.0593$ 。因此方案 2 即特高压直流分层接入方式最优。

表 3 给出了分别基于线性加权和法^[8]、灰色综合方法^[14]、模糊优选方法^[16]的特高压直流接入方式优选结果。

表 3 基于不同优选方法的特高压直流接入方式优选结果

Table 3 Results of optimal connection mode selection for different selection methods

优选方法	不同接入方案优选排序		
	接入 500 kV	分层接入	接入 1 000 kV
线性加权和法	3	1	2
灰色综合方法	3	1	2
模糊优选方法	3	1	2

本文的优选结果与表 3 中采用各种方法所得优选结果一致,验证了本文方法的有效性。同时,对特高压直流分层接入方式下的电网进行各种安全稳定校核仿真,结果表明此种方式下电网潮流分布均匀合理,线路变压器等均未过载,静态安全分析能够通过,单一故障暂态稳定校核(即“N-1”暂态稳定校核)和严重故障暂态稳定校核(即“N-2”暂态稳定校核)均能达到安全稳定标准,验证了分层接入方式的合理性以及本文所提方法的可行性。因此,“十三五”期间,蒙西—武汉特高压直流接入方式可优先考虑分层接入 500 kV 和 1 000 kV 交流网架。

4 结论

随着我国特高压交直流的快速发展,多馈入直流的电网越来越多,特高压直流的接入方式也不再局限于受端 500 kV 交流网架,研究特高压直流的接入方式具有重要的实际应用价值。本文建立了一套考虑电网的网损、静态安全性、多馈入短路比等重要因素的评价指标体系,全面考虑了特高压直流接入对电网的影响。分析了以主客观加权属性值一致化为目标的最优组合权重求取方法,并以相对贴

近度指标来量化评估各接入方案。最后,将所提的优选方法应用于“十三五”期间蒙西—武汉特高压直流接入方式的优选中,得出最优接入方案为分层接入500 kV 和 1000 kV 交流网架。

本文所提评价指标概念明确,全面考虑了特高压直流接入的影响,优选方法简单,易于实现。所提方法也可以为多馈入直流系统多回特高压直流接入方案的优选决策提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2004:125-127.
- [2] 邵瑶,汤涌. 多馈入交直流混合电力系统研究的综述[J]. 电网技术, 2009,33(17):24-30
SHAO Yao,TANG Yong. Current situation of research on multi-infeed AC/DC power system[J]. Power System Technology, 2009,33(17):24-30.
- [3] CHANGCHUN Z,ZHENG X. Study on commutation failure of multi-infeed HVDC system[C]//Proceedings of International Conference on Power System Technology. Kunming,China:IEEE/PES,2002:2462-2466.
- [4] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制[M]. 北京:科学出版社,1998:153-155.
- [5] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京:机械工业出版社,2004:61-66.
- [6] 郭丽娜,刘天琪,李兴源,等. 抑制多馈入直流输电系统后续换相失败措施研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):95-99.
GUO Lina,LIU Tianqi,LI Xingyuan,et al. Measures inhibiting follow-up commutation failures in multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(11):95-99.
- [7] 杨光亮,邵能灵,郑晓冬. 多馈入高压直流输电系统中功率倒向问题[J]. 电力自动化设备,2010,30(5):22-27.
YANG Guangliang,TAI Nengling,ZHENG Xiaodong. Power converse in multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(5):22-27.
- [8] 王康,刘崇茹,韩民晓,等. 兼顾稳定性与经济性的交直流系统直流落点选择方法[J]. 电力系统自动化,2011,35(24):73-78.
WANG Kang,LIU Chongru,HAN Minxiao,et al. A method of selecting DC links termination at AC locations considering stability and economy at once[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(24):73-78.
- [9] 郭小江,郭剑波,马世英,等. 基于多馈入短路比的多直流落点选择方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(10):36-42.
GUO Xiaojiang,GUO Jianbo,MA Shiyong,et al. A method for multi DC location selection based on MISC[R]. Proceedings of the CSEE,2013,33(10):36-42.
- [10] 周勤勇,刘玉田,汤涌. 计及直流权重的多直流馈入落点选择方法[J]. 电网技术,2013,37(12):36-41.
ZHOU Qinyong,LIU Yutian,TANG Yong. A method to select terminal locations in multi-infeed HVDC power transmission system considering weights of HVDC transmission lines [J]. Power System Technology,2013,37(12):36-41.
- [11] 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.
- [12] 赵云飞,陈金富. 层次分析法及其在电力系统中的应用[J]. 电力自动化设备,2004,24(9):85-87.
ZHAO Yunfei,CHEN Jinfu. Analytic hierarchy process and its application in power system [J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(9):85-87.
- [13] 国连玉,李可军,梁永亮,等. 基于灰色模糊综合评判的高压断路器状态评估[J]. 电力自动化设备,2014,34(11):161-167.
GUO Lianyu,LI Kejun,LIANG Yongliang,et al. HV circuit breaker state assessment based on gray-fuzzy comprehensive evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(11):161-167.
- [14] 沈阳武,彭晓涛,毛荀,等. 特高压落点规划的评价指标体系和方法[J]. 电网技术,2012,36(12):44-53.
SHEN Yangwu,PENG Xiaotao,MAO Xun,et al. Comprehensive evaluation indexes framework and evaluation method on location layout of UHV substations[J]. Power System Technology, 2012,36(12):44-53.
- [15] 陈晶腾,林韩,蔡金铤,等. 一种引入熵函数进行组合赋权的直流落点选择方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(1):146-152.
CHEN Jingteng,LIN Han,CAI Jinding,et al. DC-link location selection by combination weighting based on entropy function [J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(1):146-152.
- [16] 代仕勇,彭晓涛,王丹,等. 基于模糊优选的特高压输电方式综合评价方法[J]. 高电压技术,2012,38(12):16-22.
DAI Shiyong,PENG Xiaotao,WANG Dan,et al. Comprehensive evaluation method of ultra high voltage transmission modes based on fuzzy optimization [J]. High Voltage Engineering, 2012,38(12):16-22.
- [17] 江文奇. 多属性决策的组合赋权优化方法[J]. 运筹与管理,2006,15(6):40-43.
JIANG Wenqi. Optimizing method of combination weighting of multi-attribute decision-making [J]. Operations Research and Management Science,2006,15(6):40-43.
- [18] 林伟芳,汤涌,卜广全. 多馈入交直流系统短路比的定义和应用[J]. 中国电机工程学报,2008,28(10):1-8.
LIN Weifang,TANG Yong,BU Guangquan. Definition and application of short circuit ratio for multi-infeed AC/DC power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(10):1-8.
- [19] DENIS L H A,ANDERSSON G. Use of participation factors in modal voltage stability analysis of multi-infeed HVDC systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1998,13(1):203-211.
- [20] CIGRE Working Group B4.41. Systems with multiple DC infeed [R]. Paris,France:CIGRE,2008.
- [21] 王伟,张粒子,麻秀范. 基于模糊综合评价的结构元中压配电网规划[J]. 电力系统自动化,2006,30(12):42-46.
WANG Wei,ZHANG Lizi,MA Xiufan. Medium-voltage distribution system planning with fuzzy comprehensive evaluation and configuration-unit [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(12):42-46.
- [22] 王学军,郭亚军. 基于 G1 法的判断矩阵的一致性分析[J]. 中国管理科学,2006,14(3):65-70.

控制设计[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(6): 125-130.

FAN Yuanliang, MIAO Yiqun, JIANG Quanyuan, et al. Generator control design based on droop control architecture for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(6): 125-130.

- [32] 梁建钢, 金新民, 吴学智, 等. 基于下垂控制的微电网变流器并网运行控制方法改进[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 59-65.
LIANG Jiangang, JIN Xinmin, WU Xuezhi, et al. Improved grid-connection operation of microgrid converter based on droop control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 59-65.
- [33] 关雅娟, 郭伟扬, 郭小强. 微电网中三相逆变器孤岛运行控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(33): 52-60.
GUAN Yajuan, WU Weiyang, GUO Xiaoqiang. Control strategy

for three-phase inverters dominated microgrid in autonomous operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(33): 52-60.

作者简介:



贺超

贺超(1986—), 男, 河北昌黎人, 博士, 主要从事电能质量控制及大功率变流器驱动研究(E-mail: the_day@126.com);

王冕(1990—), 男, 贵州印江人, 博士研究生, 主要从事新能源发电研究;

陈国柱(1967—), 男, 湖北鄂州人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要从事电力电子装置及其数字控制研究(E-mail: gzchen@zju.edu.cn)。

Islanding detection based on droop control and its improvement strategy

HE Chao, WANG Mian, CHEN Guozhu

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: As the methods of passive islanding detection have large undetectable zone and the traditional methods of active islanding detection may cause the active or reactive power disturbance to output current, a method of islanding detection based on the droop control is proposed, which takes the actual frequency at PCC (Point of Common Coupling), instead of a constant in traditional droop control, as the frequency reference. When grid is normal, this frequency reference varies little due to the clamping effect of grid voltage; when an islanding occurs, it shifts quickly due to the positive feedback adjustment effect of the grid-connected inverter, based on which, an islanding is thus detected when the frequency reference exceeds a limit. A feedback strength coefficient is introduced to improve the proposed method and the boundary conditions of successful islanding detection are given. Simulation is carried out for a system with two grid-connected inverters to verify the correctness of theoretical derivation and the validity of the proposed method.

Key words: droop control; islanding detection; grid-connected inverter; frequency shift

(上接第63页 continued from page 63)

WANG Xuejun, GUO Yajun. Analyzing the consistency of comparison matrix based on G1 method[J]. Chinese Journal of Management Science, 2006, 14(3): 65-70.

- [23] 邱苑华. 管理决策熵学及其应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 168-172.
- [24] 王中兴, 张绍林, 刘雁. 基于主客观加权属性值一致化的组合赋权法[J]. 广西科学, 2007, 14(3): 247-249.

WANG Zhongxing, ZHANG Shaolin, LIU Yan. A synthetic approach to determine weights based on the identify of subjective and objective weighted attribute value[J]. Guangxi Sciences, 2007, 14(3): 247-249.

作者简介:



徐箭

徐箭(1980—), 男, 湖北咸宁人, 副教授, 博士, 主要从事电力系统电压稳定分析与控制、大规模风电并网分析与控制等研究工作(E-mail: xujian@whu.edu.cn);

张华坤(1990—), 男, 河南驻马店人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制、电力系统电压稳定(E-mail: hkzhangwhu@163.com);

孙涛(1977—), 男, 山东郓城人, 博士研究生, 主要研究方向为电力建设和运营。

Optimal selection of UHVDC connection mode to multi-infeed HVDC system

XU Jian¹, ZHANG Huakun¹, SUN Tao¹, WANG Tian¹, JIANG Yibo¹, LIN Changqing²

(1. Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China)

Abstract: The connection mode of UHVDC to multi-infeed HVDC system is researched and an evaluation index system is established to comprehensively assess the influence of different factors on the connection mode, such as network loss, static safety, multi-infeed short circuit ratio, etc. An optimal selection method based on the optimal combination weight is proposed and the combination weight optimization model based on the unification of subjectively and objectively weighted attributes is built, based on which, the candidate modes are quantitatively evaluated by the relative similarity degree to realize the optimal selection. This method is employed to select the optimal connection mode of West Mongolia-Wuhan UHVDC to Central China Power Grid and the hierarchical connection mode is selected.

Key words: multi-infeed; DC system; UHVDC power transmission; connection mode; optimal combination weight; evaluation; relative similarity degree; optimization