

VSC-HVDC 线路接入点选址及容量优化配置方法

李湘旗¹, 周 洋^{2,3}, 章 德¹, 李云丰¹, 李 勇²

(1. 国网湖南省电力有限公司经济技术研究院, 湖南 长沙 410007;

2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

3. 多特蒙德工业大学 能源系统、能源效率与能源经济研究所, 德国 多特蒙德 44227)

摘要:提出了一种新的交直流混合网络中柔性直流输电系统(VSC-HVDC)线路接入点选择和容量配置方法。在综合考虑多个典型过载工况的基础上,设计了一种综合灵敏度因子,用于评估所有可能的VSC-HVDC线路接入点,从而筛选出合适的接入点构成候选方案集。针对各候选方案在不同工况下分别建立相应的多目标优化模型,该模型以直流注入功率为决策变量,兼顾线路过载指标和容量成本。此外,还定义和引入了相关评估指标以衡量不同候选方案下所得的结果,从而确定了最优方案。通过对新英格兰标准系统进行仿真,仿真结果表明所提方法能够改善电网 $N-1$ 故障下的过载问题并尽可能降低直流容量成本。

关键词:VSC-HVDC; 接入点选址; 容量配置; 综合灵敏度因子; 线路过载; 优化

中图分类号:TM 722

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202011007

0 引言

随着大规模风光发电等可再生能源大量接入电网,以及主动配电网中分布式电源的广泛应用,可再生能源及分布式电源的随机性和间歇性使电网的源荷两侧呈现不确定性特征,这种不确定性给电网的安全稳定运行带来了诸多影响^[1-4]。因此研究电网在检修或者规划期间的安全可靠运行,尤其是 $N-1$ 故障问题十分必要^[5]。当发生 $N-1$ 故障后,电网中的器件或线路易发生重载或者过载。现有文献主要采用切负荷方法解决过载问题,该方法会造成用户缺电损失,影响供电可靠性^[6-7]。因此有必要探索新技术,在解决 $N-1$ 故障下过载问题的同时,降低或避免用户缺电损失。

柔性直流输电系统(VSC-HVDC)由自关断开关器件构成,不仅可以方便地控制潮流方向,而且在电网发生故障时既可向故障区域提供有功功率的紧急支援,又可以补偿无功功率,从而改善系统的电压和功角稳定性^[8-9]。本文采用VSC-HVDC来缓解发生 $N-1$ 故障后的电网过载问题,从而进一步发挥VSC-HVDC的功效并扩展其应用范围。

由于VSC-HVDC线路的选址定容直接影响到直流输电的能量传输和各项调控功能,尤其VSC-HVDC线路在不同位置并网时,其对电网过载的调节能力也不同;同时VSC-HVDC高昂的成本也对其工业推广应用有很大的影响,有必要对VSC-HVDC线路的选址定容问题进行深入研究。目前,国内外

相关学者对VSC-HVDC线路接入电网的选址定容问题进行了研究。文献[10]以多分区综合供电能力为指标,研究了VSC-HVDC线路的选址定容方案。文献[11]深入考虑了多馈入直流交互影响,对节点进行分区选址。文献[12]引入直流权重考虑直流之间的相互影响,选择直流落点。文献[13]基于多馈入短路比、提出整体性、干扰性与均衡性指标进行综合评估从而选点。文献[14]考虑经济性最优来研究直流落点的选择问题。文献[15-16]利用有效短路比、静态电压指标和功率损耗来评价直流落点。总结以上文献发现,已有文献大多集中在多直流馈入方面,并且主要针对稳定性指标多馈入短路比,附带考虑一些线损或经济性研究,很少考虑VSC-HVDC线路的选址,更缺少考虑在VSC-HVDC线路选址定容时 $N-1$ 故障下的电网过载问题。

基于以上分析,如何合理地选择交直流耦合接入点,充分发挥VSC-HVDC线路的控制能力,减少 $N-1$ 故障下交流线路的过载问题,使电网内部的潮流分布更加合理,显得尤为重要。此外,考虑到VSC-HVDC较高的建设成本,本文希望找到一种新方法,在计及过载改善效果与容量成本经济性的情况下,实现VSC-HVDC线路接入点选址及容量优化配置。

综上所述,本文从电网安全的角度提出了一种VSC-HVDC线路接入点选择和容量优化配置方法。首先,定义了线路过载和功率灵敏度。在此基础上,提出了一种用于评估VSC-HVDC线路接入点的综合灵敏度因子,以便筛选VSC-HVDC线路的候选接入点。然后,建立了考虑过载指标和容量成本最小化的多目标优化模型,为确定VSC-HVDC线路位置和容量而提供了一种经济有效的方法。最后,结合多

收稿日期:2020-03-19;修回日期:2020-09-07

基金项目:国网湖南省电力有限公司科技项目(5216A218000B)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Hunan Electric Power Co.,Ltd.(5216A218000B)

个典型过载工况,通过 $N-1$ 故障案例分析,对该方法的有效性进行了评估和验证。

1 VSC-HVDC 线路的综合灵敏度因子设计

一般而言,交流线路的功率不应超过其热极限。当电网发生 $N-1$ 故障时,交流线路中的功率可能超过其热极限。因此,引入交流线路负载率的概念反映当前支路的热状况:

$$L_k^s = \left| P_{ac,k}^s / P_{ac,k}^{\max} \right| \times 100\% \quad (1)$$

其中, L_k^s 为工况 s 下交流线路 k 的负载率; $P_{ac,k}^s$ 为工况 s 下交流线路 k 的有功功率; $P_{ac,k}^{\max}$ 为交流线路 k 的热极限。若 $L_k^s > 100\%$,则交流线路 k 过载。为评估线路 k 的过载程度,定义线路 k 的过载率 ΔL_k^s 为:

$$\Delta L_k^s = L_k^s - 1 \quad (2)$$

定义过载工况为系统含有过载支路的运行情况。基于式(2),计算 ΔL_k^s 对应的权重因子 ω_k^s :

$$\omega_k^s = \Delta L_k^s / \sum_{s \in \Omega} \sum_{k \in \Psi} \Delta L_k^s \quad (3)$$

其中, Ω 为所有过载工况集合; Ψ 为过载工况 s 下所有过载支路集合。此外根据功率流向,VSC-HVDC含有受端与送端。针对 $N-1$ 故障下的过载问题,当1条VSC-HVDC线路连接于电网中时,需要确定其送端与受端的接入点。接入后相当于对电网的2个节点注入功率,即VSC-HVDC线路接入可视为同时调节电网2个节点的注入功率。

定义功率灵敏度 $\gamma_{k,mn}^s$ 为交流线路 k 的功率变化量与连接于节点 m,n 间的调控装置(如VSC-HVDC)的功率变化量之比^[17],该参数基于功率传输分布系数获得^[18],表示VSC-HVDC对交流线路 k 的潮流影响和功率调节能力。 $\gamma_{k,mn}^s$ 的数学表达式为:

$$\gamma_{k,mn}^s = \Delta P_{ac,k}^s / \Delta P_{dc}^s \quad (4)$$

其中, $\Delta P_{ac,k}^s$ 为工况 s 下交流线路 k 的功率变化量; ΔP_{dc}^s 为工况 s 下VSC-HVDC线路的功率变化量。 $\gamma_{k,mn}^s$ 可定量评估在交直流混合网络中的VSC-HVDC对交流线路是否有影响,并显示VSC-HVDC对交流线路有功调控能力的大小,以及正负影响:若 $\gamma_{k,mn}^s > 0$,则 ΔP_{dc}^s 和 $\Delta P_{ac,k}^s$ 正相关, $\Delta P_{ac,k}^s$ 随 ΔP_{dc}^s 的增加而增加;若 $\gamma_{k,mn}^s = 0$,则 ΔP_{dc}^s 和 $\Delta P_{ac,k}^s$ 不相关,直流线路的潮流对该交流线路的潮流没有影响;若 $\gamma_{k,mn}^s < 0$,则 ΔP_{dc}^s 和 $\Delta P_{ac,k}^s$ 呈负相关, $\Delta P_{ac,k}^s$ 随 ΔP_{dc}^s 的增大而减小。

由于在进行高压直流输电线路的选址时,应综合考虑线路的整体过载情况,不能只考虑1条线路过载,也不能只考虑1个过载工况。本文设计一种综合灵敏度因子 β ,由于不同运行方式下的灵敏度不相同,在设计综合灵敏度因子^[7]时,测试了所有线路的 $N-1$ 故障情况,并识别其中存在的所有线路过载工况,从而使所设计的综合灵敏度因子可以囊括多个不同过载工况的综合效果。基于式(3)与式(4),

利用VSC-HVDC线路对过载支路 k 的灵敏度 $\gamma_{k,mn}^s$ 和过载支路 k 上过载率的权重因子 ω_k^s ,根据线性加权法可得综合灵敏度 β 。因此,连接于节点 m 与 n 间的VSC-HVDC线路的综合灵敏度因子 β_{mn} 为:

$$\beta_{mn} = \sum_{s \in \Omega} \left| \sum_{k \in \Psi} \omega_k^s \gamma_{k,mn}^s \right| \quad (5)$$

由式(5)可知, β_{mn} 反映了连接于节点 m 与 n 间的VSC-HVDC线路对所有过载工况的综合调节能力。在实际运用中,过载工况集合 Ω 、支路集合 Ψ 由系统的网络拓扑结构决定,权重因子 ω_k^s 主要与线路的传输功率、额定功率有关;而线路的传输功率主要由发电机出力和负荷的功率需求决定;灵敏度 $\gamma_{k,mn}^s$ 与输电线路的阻抗有关。综上所述,影响该综合灵敏度因子 β_{mn} 的主要因素是电网的拓扑结构、发电机出力、负荷功率需求、输电线路的额定功率以及输电线路的阻抗值。

基于式(5),将所有的综合灵敏度因子组合成一个综合灵敏度矩阵 B :

$$B = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \cdots & \beta_{1n} & \cdots & \beta_{1N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \beta_{m1} & \cdots & \beta_{mn} & \cdots & \beta_{mN} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \beta_{M1} & \cdots & \beta_{Mn} & \cdots & \beta_{MN} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, M 和 N 为系统节点总数,分别对应矩阵 B 任意行 m 和任意列 n 的总行数和总列数。矩阵 B 中各元素反映了VSC-HVDC线路的接入位置对改善各场景下各过载支路的综合效应。为使VSC-HVDC线路的功率更小,且更好地发挥VSC-HVDC对线路过载的缓解作用,首先要考虑 β 较大的位置。根据所设计的 β ,对所有可能的VSC-HVDC线路位置的 β 进行排序,找出 β 较大的VSC-HVDC线路位置,作为后续流程的候选位置方案。至此,本节设计了一种VSC-HVDC线路的综合灵敏度因子 β ,以得到VSC-HVDC线路的候选接入点方案,将之嵌入所提方法中可以明显减少优化过程的迭代计算量。

2 基于VSC-HVDC线路的交直流系统多目标优化建模

根据第1节所提方法确定VSC-HVDC线路的候选安装节点后,通过优化VSC-HVDC线路的有功功率,可以影响交流输电线路的潮流,使全局潮流分布更加合理。因为交直流系统的运行具有较大的灵活性,VSC-HVDC的变换器有功功率设定值可以针对某一目标单独设定和调整。本文的目标是降低交流线路过载和容量成本,这2个目标通常是相互矛盾的:过载抑制能力越强,对容量的要求越高;过载抑制能力越差,对容量的要求越低。因此,本文针对上

述问题建立多目标优化决策模型。

2.1 过载目标

当电网中配置 VSC-HVDC 时,直流注入功率会对交流线路 k 的有功功率产生影响,基于式(4)可得, $\Delta P_{dc}^s \gamma_k^s$ 表示 VSC-HVDC 的注入功率导致电网中的交流过载线路 k 产生的有功功率变化量 $\Delta P_{ac,k}^s$ 。基于式(1)和式(2),将集合 Ψ 中所有过载线路的过载率 ΔL_k^s 累加,可求得该系统工况 s 下的全局过载指标 G 。全局过载指标 G 用于评估发生 $N-1$ 故障时的全局过载严重程度,其表达式为:

$$G = \left| \sum_{k \in \Psi} \left(\frac{P_{ac,k}^s + P_{dc}^s \gamma_k^s}{P_{ac,k}^{\max}} - 1 \right) \right| \quad (7)$$

其中, P_{dc}^s 为 VSC-HVDC 线路的注入功率,表示多目标优化模型中的决策变量。

基于此,过载目标函数可表示为:

$$f_1(x) = \hat{G} \quad (8)$$

其中, $\hat{G}$ 为 G 的规范化结果, $\hat{G} = G/G_{\max}$, $G_{\max}$ 为 G 的最大值。

2.2 容量成本目标

容量成本函数可表示为:

$$C = C_{\text{base}} + P_{dc}^s C_{\text{unit}} \quad (9)$$

其中, C 为直流输电安装的经济成本; C_{base} 为基本安装成本; C_{unit} 为单位容量成本。

故容量成本目标函数可表示为:

$$f_2(x) = \hat{C} \quad (10)$$

其中, $\hat{C}$ 为 C 的规范化结果, $\hat{C} = C/C_{\max}$, $C_{\max}$ 为 C 的最大值。

2.3 约束条件

交流节点的有功、无功功率平衡约束^[19]分别为:

$$P_{gi} - P_{di} - P_{si} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (11)$$

$$Q_{gi} - Q_{di} - Q_{si} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (12)$$

其中, P_{gi} 和 Q_{gi} 分别为节点 i 中发电机的有功和无功输出; P_{di} 和 Q_{di} 分别为节点 i 中负荷需求的有功和无功功率; P_{si} 和 Q_{si} 分别为交流系统节点 i 向直流系统传输的有功和无功功率; U_j 为节点 j 的电压幅值; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为支路 ij 的电导、电纳值; θ_{ij} 为节点 i 和节点 j 的电压相位差。

为避免在减少当前过载线路的同时产生新的线路过载,设置如下约束条件:

$$P_{ac,k}^s + P_{dc}^s \gamma_k^s \leq P_{ac,k}^{\max} \quad k \in \Phi \quad (13)$$

其中, Φ 为所有未过载支路的集合。

此外, VSC-HVDC 线路的功率约束为:

$$P_{dc}^{\min} \leq P_{dc}^s \leq P_{dc}^{\max} \quad (14)$$

其中, $P_{dc}^{\min}$ 和 $P_{dc}^{\max}$ 分别为 VSC-HVDC 线路注入功率的下限和上限。

节点电压和支路电流限幅分别为:

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \quad (15)$$

$$I_{ij}^{\min} \leq I_{ij} \leq I_{ij}^{\max} \quad (16)$$

其中, $U_i^{\min}$ 和 $U_i^{\max}$ 分别为节点 i 的电压下限和上限; $I_{ij}^{\min}$ 和 $I_{ij}^{\max}$ 分别为支路 ij 电流的下限和上限。

发电机的功率约束为:

$$P_{gi}^{\min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{\max} \quad (17)$$

$$Q_{gi}^{\min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{\max} \quad (18)$$

其中, $P_{gi}^{\min}$ 、 $P_{gi}^{\max}$ 和 $Q_{gi}^{\min}$ 、 $Q_{gi}^{\max}$ 分别为发电机节点 i 有功功率和无功功率的下限、上限。

2.4 多目标优化模型

基于以上分析,建立目标函数式(19)来协调线路过载的效果和容量经济成本最小化,多目标优化模型的约束条件见式(20)。

$$\min f(x) = \lambda_c f_1(x) + \lambda_c f_2(x) \quad (19)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \lambda_c + \lambda_c = 1 & \lambda_c \geq 0, \lambda_c \geq 0 \\ \text{式(11)—(18)} \end{cases} \quad (20)$$

其中, λ_c 、 λ_c 分别为过载目标、容量成本目标的权重因子。

2.5 容量配置和评估指标

基于以上模型,建立不同系统状态时交直流电网的优化模型, P_{dc}^s 作为决策变量,可得在此工况下的 VSC-HVDC 线路有功容量需求。为了减轻所有线路的过载问题,选取所有可能线路过载工况下的直流有功需求最大值 P_{dc}^{cap} 来确定 VSC-HVDC 线路容量:

$$P_{dc}^{\text{cap}} = \max (P_{dc}^1, P_{dc}^2, \dots, P_{dc}^s, \dots) \quad s \in \Omega \quad (21)$$

定义最终评估指标 F_s , 对方案综合效果进行评估:

$$F_s = \lambda_c \hat{G} + \lambda_c \hat{C} \quad (22)$$

为进一步定量评估该方法下各方案的综合优化效果,定义统一评估指标 Π , 其为各工况下最终评估指标的累加,见式(23)。指标 Π 越小,对应方案抑制线路过载和降低容量成本的效果越好。

$$\Pi = \sum_{s \in \Omega} F_s \quad (23)$$

3 VSC-HVDC 线路的选址与定容方法

基于上述设计方法和多目标优化模型,提出一种 VSC-HVDC 线路接入点选择和容量配置的总体方法。首先,需要确定所有单线中断情况下的所有过载情况,根据过载线路设计综合灵敏度因子,基于此,筛选出候选接入点;然后,针对候选方案分别建立多目标优化模型,求解模型并对各候选方案进行统一评估,确定最终接入点和所配置的容量。所提方法的详细流程图见附录图 A1,具体步骤可归纳如下:

(1)根据过载工况的定义,辨识所存在的过载工况和各工况的过载线路,构成过载工况集合 Ω 和过载线路集合 Ψ ;

(2)利用式(2)和式(3)计算各过载工况中过载线路的权重因子,再通过式(4)计算过载线路的功率灵敏度 $\gamma_{k,mn}^s$;

(3)根据式(5),通过线性加权求得VSC-HVDC线路对所有过载线路的综合灵敏度因子 β_{mn} ,构成综合灵敏度矩阵 B ;

(4)对矩阵 B 中的所有元素从大到小进行排序,较大的元素所对应的若干组接入点被筛选为候选接入点,得到候选方案集 H ;

(5)利用式(19)和式(20)所构建的模型,对候选方案的不同工况进行多目标优化建模和求最优解,从而利用式(21)确定该候选方案的容量配置,对所有候选方案执行此步骤;

(6)根据式(22)和式(23)计算不同候选方案的评估指标,利用评估指标对各候选方案进行分析和对比,找出最佳评估指标,确定最终接入点方案,并进行容量配置。

4 案例分析与仿真验证

本节以新英格兰电力系统为例验证所提方法,新英格兰电力系统的电网结构见附录图A2。该测试系统由10台同步发电机、39条母线和46条支路组成。在该电力系统中考虑如何选择VSC-HVDC线路的接入点并根据功率需求配置容量,以有效缓解电网发生 $N-1$ 故障时的线路过载问题。仿真部分基于Matpower的IEEE标准稳态模型,该模型通常用于潮流分析,标准39节点系统的潮流数据见文献[20]。

4.1 线路过载场景辨识

如上所述,该电力系统共包含46条支路,除去导致发电机断开停运的11种线路故障外,在这个仿真中共考虑35种 $N-1$ 单线故障情况。根据每条支路的线路负荷,找出各运行工况下的过载线路。在35种 $N-1$ 故障方案中,辨识出9种过载工况(S_1-S_9),每种过载工况的故障线路标识见图A2。通过对过载工况集进行分析可得,辨识出的过载工况可分为3类:①单线过载工况(S_1, S_3, S_6, S_9);②双线过载工况(S_4, S_5, S_8);③多条线路过载工况(S_2, S_7)。将这9种过载工况作为典型的接入点选择和仿真验证工况,具有一定的代表性。

4.2 VSC-HVDC线路接入点的初步筛选

基于上述辨识结果,9种过载工况下共有16条支路过载。当1条支路在不同工况中过载时,被视为2种线路过载工况。根据式(2)和式(3),权重系数 ω_k^s 可以通过过载支路的过载率计算。然后根据式(6)获取VSC-HVDC线路不同接入点对应的综合灵敏度因子,如图1所示。

图1中最大的综合灵敏度因子为16。 β 三维曲

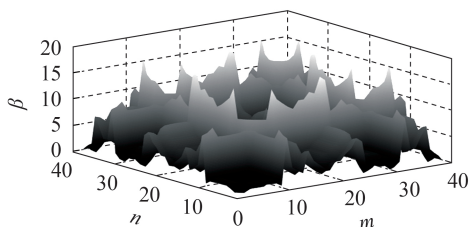


图1 VSC-HVDC线路不同接入点下 β 的计算结果

Fig.1 Calculative results of β under different access points of VSC-HVDC line

线是关于主对角线对称的,这是因为VSC-HVDC线路有2个接入点,接入点坐标 (m, n) 和 (n, m) 在本文中为相同的位置,即 $\beta_{mn} = \beta_{nm}$ 。此外,当 $m=n$ 时,VSC-HVDC线路的2个接入点连接到同一个电网节点上,此时无实际意义,则 β 无意义。由图A2可知,发电机母线31—39两侧分别为发电机侧和电网侧,发电机侧只与发电机相连,而电网侧与1条或多条母线相连(如发电机母线31—38分别仅与电网母线6、10、19、20、22、23、25、29相连,而发电机母线39与电网母线1和9相连)。当发电机母线电网侧仅与1条电网母线相连(如电网母线10和发电机母线32)时,接入VSC-HVDC后,2个接入点的注入功率对电网侧的影响相同,2条母线所对应的综合灵敏度因子的计算结果相等。仅从功率灵敏度来看,2条母线的功率传输分布系数相等,即节点10作为VSC-HVDC线路接入点和节点32作为VSC-HVDC线路接入点是等效的。综上针对发电机母线节点31—38,本文将其和与之相连接的节点归为同一接入点,不予以单独考虑。

将图1所示的综合灵敏度因子由大到小进行依次排列,筛选出前10个综合灵敏度因子所对应的VSC-HVDC线路接入电网的候选节点,作为候选接入点方案 H_1-H_{10} ,所对应的接入点坐标依次为:(23,10)、(24,10)、(14,10)、(21,10)、(15,10)、(22,10)、(16,10)、(19,10)、(20,10)、(17,10)。

4.3 VSC-HVDC线路接入点的确定及容量配置

由于上文已经选出的有效候选位置,为了进一步确定VSC-HVDC线路的最终接入点,针对4.2节所得的10种候选方案进行优化建模和深入分析。首先,采用遍历法对优化模型中的权重因子 λ_c 和 λ_g 进行检验,通过比较分析可知,当 $\lambda_g = 0.67$ 和 $\lambda_c = 0.33$ 时,可以更加有效地缓解过载,并合理降低容量成本;然后,根据式(21)建立不同工况的优化模型,基于CPLEX求解器可得各工况下的最优解,并基于所求解的结果,对各候选方案进行评估和对比。

图2为候选方案在不同工况下的最终评估指标和统一评估指标。通过统一评估指标可以定量评估不同候选方案对所有典型工况的总体效果。候选方

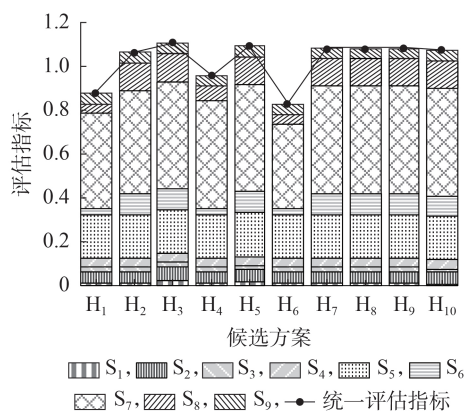


图2 候选方案在不同工况下的最终评估指标和统一评估指标

Fig.2 Final evaluation indices under different operation conditions and unified evaluation indices of candidate schemes

案 H_1 — H_{10} 在不同工况下的最终评估指标值分别为 0.877、1.060、1.106、0.955、1.092、0.828、1.083、1.083、1.083、1.074。由图 2 可知, S_7 的过载指标在所有工况中占比最大, 即 S_7 的过载情况最为严重; 候选方案 H_6 的统一评估指标最小。综上所述, 方案 H_6 具有最佳的过载抑制能力, 且其容量配置最为合理。

由式 (20) 可知, 优化模型目标函数兼顾了过载指标和容量成本。图 3 为不同工况下 10 种候选方案与无 VSC-HVDC 方案的过载指标比较结果。由图可知, 9 种工况下无 VSC-HVDC 方案的过载指标始终大于其他方案, 意味着电力系统无 VSC-HVDC 接入时, 线路过载最为严重。10 种候选方案中, H_6 基本处于最低点。由于过载指标值越小, 方案对过载的缓解能力越强, 各候选方案的过载指标数据结果见附录表 A1。由表可知, 不同工况下 H_1 — H_{10} 的过载指标总和分别为 1.21、1.473、1.584、1.252、1.531、1.037、1.521、1.521、1.512, H_6 具有最小的过载指标, 则 H_6 具有最佳的过载抑制能力。

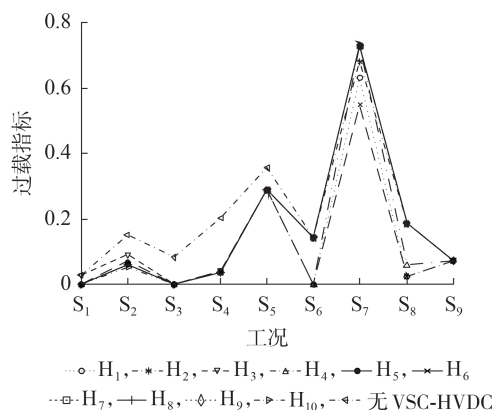


图3 候选方案在不同工况下的过载指标结果

Fig.3 Overload index results of candidate schemes under different operation conditions

附录表 A2 为不同工况下候选方案的最优直流功率注入值和容量配置结果 (直流注入功率不计流向), 候选方案 H_1 — H_{10} 的直流注入功率分别为 86、50、50、76、50、86、50、50、50、50 MW。表中, 直流功率数值为 0 表示该方案中的 VSC-HVDC 线路不具备过载抑制能力。在单一候选方案下, 求解各工况的最佳功率注入值, 然后取所有工况下的直流功率需求最大值并取整, 作为该方案下需要配置的容量。虽然 H_1 与 H_6 的配置容量相等, 但在 S_7 下 H_1 的过载指标明显高于 H_6 。其他 8 种候选方案的配置容量均比 H_6 配置容量小, 但过载指标比 H_6 大得多。所以候选方案 H_6 的容量配置最为合理。

5 结论

本文提出了一种交直流混合电网中 VSC-HVDC 线路接入点选择和容量配置方法, 旨在缓解多种工况下的线路过载问题。所得结论如下。

(1) 所提方法充分地考虑了所有可能的单线支路故障的系统状态, 设计了综合灵敏度因子, 对 VSC-HVDC 线路的接入点候选方案进行初步筛选, 从而大幅减少了后期优化过程中的计算量。

(2) 针对 VSC-HVDC 线路的所有候选位置, 建立了兼顾过载改善能力和容量成本最小化的交直流系统多目标优化模型。求解最优直流注入功率, 并利用评估指标对不同候选方案进行对比分析, 从而确定最终的接入点方案并完成容量配置。

(3) 仿真结果表明, 所提方法能在缓解交流线路过载压力的同时尽可能降低容量成本, 为 VSC-HVDC 线路接入电网的选址定容规划提供了新的思路, 扩展了 VSC-HVDC 的应用场景。

此外, 在确定 VSC-HVDC 线路最优接入点和容量配置时, 其他技术指标也是值得考虑的。因此, 接下来将考虑 VSC-HVDC 线路接入对电网电压稳定的影响等问题, 作为其他优化指标对本文研究成果进行进一步扩展。

附录见本刊网络版 (<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 唐西胜, 陆海洋. 风电柔性直流并网及调频控制对电力系统功角稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4027-4035.
TANG Xisheng, LU Haiyang. Impact of VSC-HVDC based wind power on power system angle stability considered of frequency control[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4027-4035.
- [2] 秦超, 曾沅, 苏寅生, 等. 基于安全域的大规模风电并网系统低频振荡稳定分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5): 100-106.
QIN Chao, ZENG Yuan, SU Yinsheng, et al. Low-frequency oscillatory stability analysis based on security region for power system with large-scale wind power[J]. Electric Power Auto-

- mation Equipment, 2017, 37(5):100-106.
- [3] 方伟, 刘怀东, 秦婷, 等. 含大型光伏电站的动态安全域[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3):189-193, 199.
FANG Wei, LIU Huaidong, QIN Ting, et al. Dynamic security region with large-scale photovoltaic plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3):189-193, 199.
- [4] 庄慧敏, 巨辉, 肖建. 高渗透率逆变型分布式发电对电力系统暂态稳定和电压稳定的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17):84-89.
ZHUANG Huimin, JU Hui, XIAO Jian. Impacts of inverter interfaced distributed generations with high penetration level on power system transient and voltage stability[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17):84-89.
- [5] 刘佳, 徐谦, 程浩忠, 等. 考虑 $N-1$ 安全的分布式电源多目标协调优化配置[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7):84-92.
LIU Jia, XU Qian, CHENG Haozhong, et al. Multi-objective coordinated DG planning with $N-1$ security[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7):84-92.
- [6] 毛思杰, 贾燕冰, 张琪. 计及过载线路发热严重程度的紧急控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16):34-42.
MAO Sijie, JIA Yanbing, ZHANG Qi. Research on emergency control method considering severity of overheating of overload line[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16):34-42.
- [7] 张衡, 程浩忠, 曾平良, 等. 考虑 $N-1$ 安全网络约束的输电网结构优化[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2):123-129.
ZHANG Heng, CHENG Haozhong, ZENG Pingliang, et al. Optimal transmission switching considering $N-1$ security network constraints[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2):123-129.
- [8] 陈鹏远, 黎灿兵, 周斌, 等. 异步互联电网柔性直流输电紧急功率支援与动态区域控制偏差协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(14):3025-3034.
CHEN Pengyuan, LI Canbing, ZHOU Bin, et al. VSC-HVDC emergency power support and dynamic area control error coordinated control strategy for improving the stability of asynchronous interconnected power grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(14):3025-3034.
- [9] 陈厚合, 黄亚磊, 姜涛, 等. 含VSC-HVDC的交直流系统电压稳定分析与控制[J]. 电网技术, 2017, 41(8):2429-2435.
CHEN Houhe, HUANG Yalei, JIANG Tao, et al. Voltage stability analysis and control for AC/DC system with VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2017, 41(8):2429-2435.
- [10] 唐晓骏, 韩民晓, 谢岩, 等. 应用于城市电网分区互联的柔性直流容量和选点配置方法[J]. 电网技术, 2019, 43(5):1709-1716.
TANG Xiaojun, HAN Minxiao, XIE Yan, et al. Capacity and siting configuration method of VSC-HVDC applied to urban power grid partition interconnection[J]. Power System Technology, 2019, 43(5):1709-1716.
- [11] 蔡国伟, 史一明, 杨德友. 基于节点聚类分簇的多馈入直流落点筛选方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(9):140-148.
CAI Guowei, SHI Yiming, YANG Deyou. Multi-infeed DC terminal location selection method based on clustering nodes[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(9):140-148.
- [12] 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):3336-3341.
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):3336-3341.
- [13] 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 terminal location selection based on multi-infeed short circuit ratio[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10):36-42.
- [14] 肖谭南, 肖帅, 王建全, 等. 基于PSO的特高压交流变电站布点、直流落点及新建线路自动选择方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(3):815-823.
XIAO Tannan, XIAO Shuai, WANG Jianquan, et al. Method for automatically determining UHV AC substation location, DC access point and new lines based on PSO[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3):815-823.
- [15] 陈晶腾, 林韩, 蔡金锭, 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] 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.
- [17] MÜLLER S C, HÄGER U, REHTANZ C. A multiagent system for adaptive power flow control in electrical transmission systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(4):2290-2299.
- [18] ZHOU Y, DALHUES S, LIU J Y, et al. Optimal power setting based on voltage angle controller for VSC-HVDC in hybrid AC and DC power systems[C]//IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Lisbon, Portugal:IEEE, 2019:2203-2208.
- [19] 郭瑞鹏, 边麟龙, 宋少群, 等. 安全约束最优潮流的实用模型及故障态约束缩减方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13):161-168.
GUO Ruipeng, BIAN Linlong, SONG Shaoqun, et al. Practical model of security constrained optimal power flow and reduction methods for contingency constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13):161-168.
- [20] ZIMMERMAN R D, MURILLO-SÁNCHEZ C E, THOMAS R J. MATPOWER: steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1):12-19.

作者简介:



李湘旗

李湘旗(1963—),男,湖南祁东人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统安全稳定、电力市场交易(E-mail:lixq@hnsgcc.com.cn);

周洋(1991—),女,湖南岳阳人,博士研究生,通信作者,主要研究方向为HVDC接入电网的运行和控制(E-mail:yangzhoutina@qq.com);

章德(1986—),男,湖南新化人,高级工程师,博士,主要研究方向为电网规划与运行(E-mail:276654908@qq.com)。

(编辑 王欣竹)

(下转第126页 continued on page 126)

and HHT[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 29 (7):1-7, 37.

作者简介:

李佳朋(1994—),男,河南南阳人,博士研究生,主要研究方向为直流电网故障分析与保护、人工智能在电力系统中的应用(E-mail:nyjp1994@163.com);

李宇骏(1990—),男,江西南昌人,副教授,博士,主要研



李佳朋

究方向为多端直流系统故障分析与故障检测、风电场对系统提供惯量和频率支撑的控制策略等(E-mail:yujunlizju@gmail.com);

宋国兵(1972—),男,河南信阳人,教授,博士,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail:song.gb@mail.xjtu.edu.cn)。

(编辑 任思思)

DC fault analysis and detection for offshore wind farms integration via MTDC

LI Jiapeng¹, LI Yujun¹, YUAN Xiaotian¹, JIA Ke², SONG Guobing¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Two-level VSC (Voltage Source Converter) and half-bridge MMC are lack of the ability to control fault DC current during DC fault. Therefore, in MTDC (Multi-Terminal DC) system, it is crucial to immediately identify and isolate the fault during the first period of DC fault, namely, capacitor discharging stage, otherwise the overall system might be out of operation due to the fast blocking of converter valves. The initial DC fault current analysis during capacitor discharging stage is the prior issue for fault detection in MTDC system. A transient equivalent model is proposed for fault analysis of MTDC system, in which only high-frequency components of the fault network are reserved, so the analysis in the failure period can be simplified. The analytical expression of fault current of faulty and healthy lines can be deduced based on the proposed model. Based on the current difference between fault lines and healthy lines, a fault detection method based on the average value of transient current is further proposed, which has the advantage of relatively low computation burden, high fault resistance tolerant ability, and relatively low sampling frequency. Numerical studies carried out in EMTF verify the accuracy of the proposed transient equivalent model and the effectiveness of the proposed fault detection method.

Key words: multi-terminal DC system; DC fault analysis; transient equivalent model; average value of transient current; DC fault detection

(上接第118页 continued from page 118)

Method of access point selection and capacity optimal configuration for VSC-HVDC line

LI Xiangqi¹, ZHOU Yang^{2,3}, ZHANG De¹, LI Yunfeng¹, LI Yong²

(1. Economic and Technological Research Institute of State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410007, China;

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

3. Institute of Energy Systems, Energy Efficiency and Energy Economics, TU Dortmund, Dortmund 44227, Germany)

Abstract: A new method of access point selection and capacity optimal configuration for VSC-HVDC line is proposed. With the consideration of multiple typical overload operation conditions, a comprehensive sensitivity factor is designed to evaluate all possible access points for VSC-HVDC line, so as to select the appropriate access points to form a set of candidate schemes. Taking the DC injected power as the decision variable and considering the line overload index and the capacity cost, the corresponding multi-objective optimization model is established for each candidate scheme under different operation conditions. In addition, related evaluation indexes are defined and introduced to measure the results under different candidate schemes, so as to determine the optimal scheme. Through the simulation of New England standard system, the simulative results show that the proposed method can effectively mitigate the overload problem under the $N-1$ contingency and reduce the DC capacity cost as much as possible.

Key words: VSC-HVDC; access point selection; capacity configuration; comprehensive sensitivity factor; line overload; optimization

附录

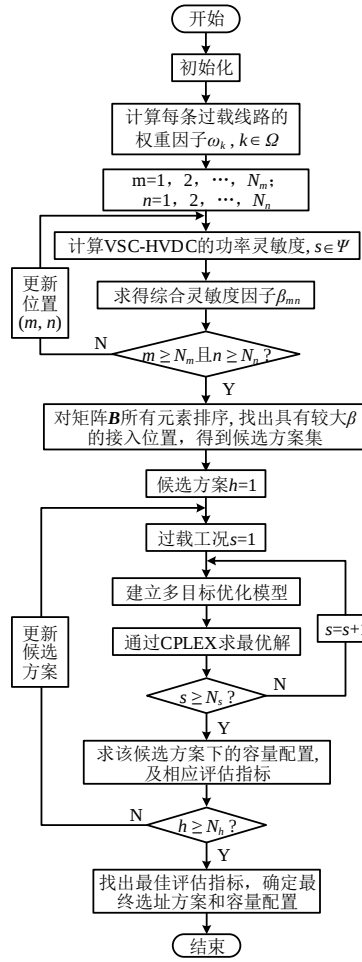


图 A1 VSC-HVDC 接入点选择和容量配置总体方法流程图

Fig.A1 Overall method flowchart of access points selection and capacity configuration for VSC-HVDC

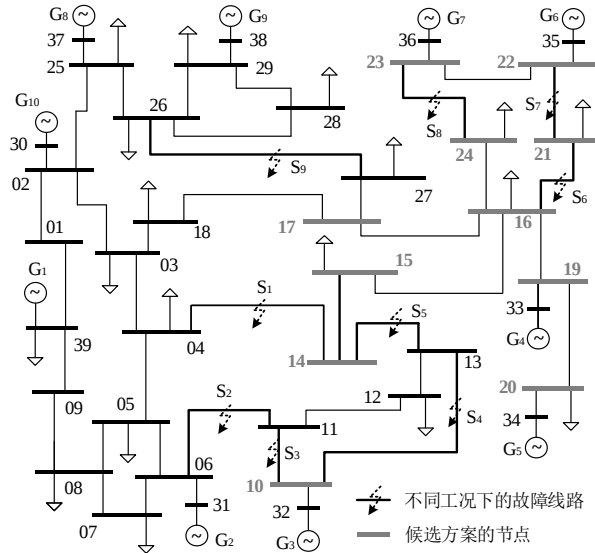


图 A2 新英格兰系统的电网结构

Fig.A2 Grid structure of New England system

表 A1 候选方案在不同工况下的过载指标数据结果

Table A1 Overload index data of candidate schemes under different operation conditions

场景编号	过载指标									
	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	H ₆	H ₇	H ₈	H ₉	H ₁₀
S ₁	0	0	0.029	0	0	0	0	0	0	0
S ₂	0.063	0.063	0.092	0.063	0.071	0.063	0.063	0.063	0.063	0.055
S ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S ₄	0.038	0.038	0.042	0.038	0.040	0.038	0.038	0.038	0.038	0.037
S ₅	0.289	0.289	0.289	0.289	0.289	0.289	0.289	0.289	0.289	0.289
S ₆	0	0.143	0.140	0	0.1430	0	0.143	0.143	0.143	0.143
S ₇	0.633	0.681	0.729	0.729	0.729	0.549	0.729	0.729	0.729	0.729
S ₈	0.025	0.186	0.186	0.059	0.186	0.025	0.186	0.186	0.186	0.186
S ₉	0.073	0.073	0.073	0.073	0.073	0.073	0.073	0.073	0.073	0.073

表 A2 候选方案在不同工况下的直流注入功率和容量配置结果

Table A2 DC injected power under different operation conditions and capacity configuration results of candidate schemes

[illegible]