

含多端柔性直流互联的交直流电力系统静态安全分析

李岩^{1,2}, 滕云¹, 冷欧阳², 王毅^{3,4}, 陆娟娟^{3,4}

(1. 沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁省沈阳市 110870; 2. 国网内蒙古东部电力有限公司, 内蒙古自治区呼和浩特市 010010; 3. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏省南京市 211106; 4. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏省南京市 211106)

摘要: 含电压源换流器的多端直流系统在工作原理及控制方式上与常规直流系统存在本质区别, 现有静态安全分析无法直接对含多端柔性直流的交直流系统分析计算。文中以传统交流电网静态安全分析为基础, 首先, 提出了多端柔性直流混联系统的交直流静态安全分析计算框架, 阐述了功能实现方法及采用的关键技术。然后, 在预想故障计算中考虑了交直流电网运行条件变化情况, 保证计算结果与实际电网运行状态一致, 提高了静态安全分析计算的准确性。最后, 通过构建含四端柔性直流的交直流混联系统仿真模型, 验证了算法的有效性和实用性。

关键词: 多端直流; 电压源换流器; 交直流混联系统; 静态安全分析

0 引言

基于电压源换流器(voltage source converter, VSC)的多端直流输电技术由于其输电能力更强、运行方式更灵活, 能够有效解决多电源供电与多落点受电问题, 将成为解决中国输电走廊紧缺与大规模可再生能源并网的有效技术手段之一^[1-2]。随着多端柔性直流输电技术的发展及特高压交直流混联系统的建设, 电网运行控制变得更加复杂, 给调度控制提出了更高的要求, 已成为未来电网调度控制系统重点研究的内容之一^[3-4]。静态安全分析作为调度控制系统的重要模块之一, 通过在线扫描预想故障, 评估其对电网安全运行产生的影响, 有效支撑了电网调度业务的开展。含 VSC 的多端直流系统在工作原理及控制方式上与常规直流存在本质区别, 现有静态安全分析无法直接对含多端柔性直流的交直流系统分析计算, 需要建立与之相适应的分析计算方法^[5]。

目前有学者针对多端柔性直流输电技术从构建方案、仿真分析、控制策略等领域开展研究, 旨在构建更高等级、更大容量的柔性直流电网。其中, 在控制策略方面, 文献[6-9]从不同角度研究了多端柔性直流系统功率控制模式及运行特性, 文献[10-11]研究了对称双极柔性直流输电系统功率转带控制策

略。在仿真分析方面, 文献[12-19]分析了 VSC 稳态模型及适用于牛顿法潮流计算的数学模型, 提出了交直流混合系统的潮流算法, 并根据控制方式的不同提出了改进算法; 文献[20]针对大型城市电网 220 kV 分区运行的问题, 提出了利用分区互联装置在分区间进行柔性互联的新思路, 以及分区柔性互联电网的静态安全性分析方法。目前关于多端柔性直流电网的研究主要集中于直流系统技术本身, 在调度应用层面上对含多端柔性交直流混联系统的静态安全分析研究成果未见相关报告。

本文以张北多端柔性直流示范性工程建设为背景, 以现有关于柔性直流系统控制方式及交直流潮流研究成果为基础, 提出了含多端柔性直流的交直流混联系统静态安全分析计算框架, 阐述了具体的功能实现方法, 考虑了交直流电网相互影响, 提高静态安全分析计算准确性, 为调度运行开展交直流系统潜在安全风险分析提供技术支撑。

1 静态安全分析功能架构

含多端柔性直流的交直流混联系统相互之间的耦合非常紧密, 在电网发生故障时会对交直流电网造成很大的影响, 交直流出现较大的功率不平衡及潮流转移, 交流电网发生频率波动。本文根据实际需求对静态安全分析功能重新设计, 计算框架如图 1 所示, 主要由预想故障集构建, 交直流潮流预想故障扫描及安全评估三个部分组成, 在技术实现上采用交直流交替迭代及动态潮流计算技术, 对预想

故障下交直流电网安全风险进行分析,计算中考虑了发电机负荷一次调频特性、换流站极间灵活功率转代、站间功率协调等因素对结果的影响,提高了静态安全分析计算的准确性,为交直流系统安全运行提供技术支撑。

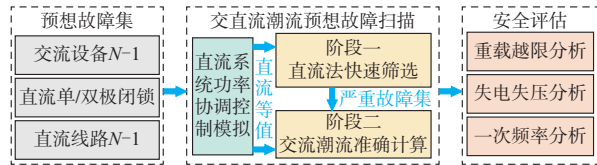


图1 静态安全分析计算框架

Fig. 1 Calculation framework of static security analysis

1.1 预想故障集构建

静态安全分析首先要根据电网设备可能发生的故障类型定义预想故障,同时将预想故障模拟为潮流计算中事故设备的开断,形成预想故障集。对于交直流混联电网主要分为交流系统预想故障和多端柔性直流系统预想故障,其中交流故障主要包括设备 $N-1$ 故障和基于人工经验维护的组合故障,直流故障主要根据多端柔性直流系统可能存在的基本运行方式形成预想故障集,包括直流线路 $N-1$ 、换流站单极闭锁、换流站双极闭锁。

1.2 交直流潮流预想故障扫描

对于已定义的交直流预想故障集,采用静态潮流计算技术进行快速扫描,辨识出对电网影响比较大的危险故障,该部分也是静态安全分析的核心。本文对于预想故障的模拟计算,采取先直流后交流的方式,首先根据直流网络运行方式的变化模拟多端柔性直流控制系统的变化,确定直流网络新的控制目标,在此基础上,基于交直流混联电网潮流技术进行分析计算,确定电网潮流变化,同时考虑到大多数预想故障对电网安全影响较小,提高预想故障扫描效率,本文采用了两阶段扫描方法,首先通过直流法进行筛选,确定出可疑危险故障集,然后利用交直流潮流交替迭代方法进行潮流计算,得到详细的潮流计算结果。

1) 多端柔性直流系统功率协同控制动作模拟

多端柔性直流输电系统为了满足系统控制的快速性和高可靠性,采用系统级站间协调控制、换流站级控制、阀组控制的三级分层控制系统架构^[3]。在发生换流极闭锁造成功率波动或直流线路故障时,通过三级控制的协调配合提供更多的控制策略,达到新的直流功率平衡,维持直流电压稳定。为了提高静态安全分析计算的准确性,本文考虑了多端柔性直流系统控制动作的模拟,计算故障后直流系统新的稳态运行状态,保证静态安全分析结果与实际

电网运行方式一致。

2) 基于直流法的预想故障快速筛选

大部分的预想故障对电网的安全运行影响很小,并非所有故障都进行详细的潮流分析,因此为了提高静态安全分析的计算速度,本文基于直流法实现交直流混联系统的预想快速筛选。对于一个预想故障,首先根据运行方式的变化进行直流系统协调控制模拟计算,形成直流网络运行状态,然后将直流下电网功率作为交流网络的等效注入,基于直流法进行支路潮流计算,以交流设备重载越限为判据进行校验,将造成交流设备重载的开断故障列为严重故障进行详细交直流迭代分析计算。

3) 考虑调频特性的交直流潮流计算

对于可疑故障集需要进行详细潮流计算,本文根据交直流算法特点及在静态安全分析应用中的适用性,选择了交直流交替迭代法进行详细潮流计算,在现有交流潮流基础上,仅增加直流电网潮流计算及交直流边界交互功能,实现较为简单^[12]。为了提高对交流电网计算的准确性,本文采用了计及机组和负荷调频特性的动态潮流计算技术进行分析计算^[21],对系统故障产生的功率不平衡问题,通过模拟机组与负荷的调频特性,克服常规预想故障扫描过程中平衡节点选取差异导致的潮流结果不同及多机分摊结果与实际运行差异的问题,提升潮流计算结果的准确性。

1.3 安全评估

安全评估主要依据预想故障扫描详细潮流计算结果进行分析计算,以系统潮流过载和电压越限为标准,辨识所有对电网安全运行有影响的故障。安全评估结果主要包括校核电网支路元件、母线电压及关键稳定断面潮流安全裕度,母线失压、负荷失电、直流交直流电网解裂情况下交流电网电压和频率分析等,为调度运行人员进行风险预判提供依据。

2 多端柔性直流系统功率协调控制动作模拟

2.1 换流站内极间功率协调控制

由组合式换流单元构成的真双极主接线方式,可在双极平衡、双极不平衡、单极回路方式下运行,在直流侧故障时只影响故障极,对非故障极几乎没有影响^[3],可实现非故障极的单极独立运行。在故障工况下,真双极系统通过直流控制保护系统实现极间功率转代^[10-11],在满足安全约束条件下保证直流系统功率最大输出。

正常运行方式下换流站双极是对称运行的,定义换流站正极和负极功率分别为 $P_{\omega_0}^+$ 和 $P_{\omega_0}^-$; 线路

输送功率为 $P_{dc,ln}^0$; 单极最大输送功率为 P_{N-1}^{\max} 。

1) 假定正换流极闭锁

功率变化量 $\Delta P = P_{\omega}^+$, 则换流站极间功率转代策略为:

$$P_{\omega}^- = \begin{cases} P_{N-1}^{\max} & \Delta P > P_{N-1}^{\max} - P_{\omega 0}^- \\ P_{\omega 0}^- + P_{\omega}^+ & \Delta P \leq P_{N-1}^{\max} - P_{\omega 0}^- \end{cases} \quad (1)$$

$$P_{\omega}^+ = 0 \quad (2)$$

式中: P_{ω}^+ 和 P_{ω}^- 分别为换流站正极、负极故障后的运行功率。

2) 假定正极直流线路 k 发生故障

功率变化量 $\Delta P = P_{dc,ln,k}^0$, 则换流站极间功率转代策略为:

$$\begin{aligned} \Delta P' &= \min(\Delta P_{dc,ln,i}^0, \Delta P) \\ P_{\omega,k}^+ &= P_{\omega 0,k}^+ + \Delta P' - \Delta P \\ P_{\omega,k}^- &= P_{\omega 0,k}^- + \Delta P - \Delta P' \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\Delta P_{dc,ln,i}^0$ 为直流线路 i 的功率裕度; $\Delta P'$ 为故障回路中功率实际变化量; $P_{\omega 0,k}^+$, $P_{\omega 0,k}^-$, $P_{\omega,k}^+$, $P_{\omega,k}^-$ 分别为与支路 k 相连换流站正极和负极故障前和故障后的运行功率。

由式(2)可知, 当故障回路中任意一条直流线路过负荷, 则该回路降功率运行, 由非故障回路在满足最大输送功率约束下进行转代。当故障回路中直流线路均未过负荷, 则换流极保持原有定功率运行。

2.2 换流站间功率协调控制

本文在静态安全分析中对换流站间功率协调控制主要考虑了主从控制、直流电压偏差控制、下垂控制。

1) 主从控制模式

将直流系统换流站划分为主换流站和从换流站两种。其中, 主换流站控制直流系统的直流电压, 维持直流系统的直流电压稳定; 从换流站则根据其是否连接有源网络选择不同的外环控制模式, 作为直流电压控制的后备换流站。当主换流站故障时, 向邻近的从换流站发出控制模式切换请求, 从换流站收到切换指令则迅速将其控制模式调整为定直流电压控制模式, 承担维持系统直流电压稳定任务。在静态安全分析计算中对主从控制模拟模式建模较为简单, 通过人工指定从换流站切换进行排序, 并设定以主换流站故障退出为启动条件, 在实际计算中只需要调整直流潮流方程即可实现。

2) 直流电压偏差控制

直流电压偏差控制与主从控制相似, 也是通过主换流器控制电压及平衡功率, 其余换流站是后备电压控制换流站, 但直流电压偏差控制主要依据各换流站设定的电压偏差裕度选择备用定直流电压换

流站, 摆脱了控制模式切换对于多端系统通信的依赖, 实现主换流站失去直流电压控制能力后直流电压控制的转换。在静态安全分析计算中对该控制模式的模拟也较为简单, 以主换流站故障为启动条件, 并依据直流潮流结果, 从换流站的电压裕度的角度, 选择直流电压裕度最小为主控换流站。

3) 直流电压下垂控制

直流电压下垂控制有效地结合了功率控制器和直流电压控制器, 将功率变化分摊到多个换流站, 实现了系统多个换流站共同作用的运行状态^[5]。在静态安全分析中以直流电压功率下垂控制器为研究对象, 模拟换流站间功率协调控制, 分析直流网络潮流分布的情况。

直流电压功率下垂控制器稳态运行特性为:

$$P_{d,i} = D_i (U_{d,i} - U_{d,ref,i}) + P_{d,ref,i} \quad (4)$$

式中: $P_{d,i}$ 和 $P_{d,ref,i}$ 分别为换流器 i 的功率及设定值; $U_{d,i}$ 和 $U_{d,ref,i}$ 分别为换流器 i 的电压及设定值; D_i 为换流器 i 的下垂系数, 表示换流器 i 的直流功率对其直流电压的灵敏度, 当 D_i 为 0 时, 表示定有功功率控制, D_i 足够大时, 处于定直流电压控制。

直流网络潮流方程可表示为:

$$\Delta P_{d,i} = P_{d,i} - U_{d,i} \sum_{j=1}^n Y_{d,ij} U_{d,j} = 0 \quad (5)$$

式中: $\Delta P_{d,i}$ 为节点 i 的有功功率适配量; $Y_{d,ij}$ 为节点 i 与 j 之间的直流线路电导; $U_{d,j}$ 为节点 j 的直流电压; n 为节点数。

式(5)的方程组采用牛顿-拉夫逊算法进行求解, 迭代方程可表示为:

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{U}_d^{(t)} = -(\mathbf{J}_d^{(t)})^{-1} \Delta \mathbf{P}_d \\ \mathbf{U}_d^{(t)} = \mathbf{U}_d^{(t-1)} + \Delta \mathbf{U}_d^{(t)} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\Delta \mathbf{P}_d$, \mathbf{U}_d , $\Delta \mathbf{U}_d$ 分别为直流节点有功功率适配量、直流电压及电压偏差量向量; 上标 t 表示迭代次数; \mathbf{J}_d 为潮流雅可比矩阵, 其元素可表示为

$$J_{d,ij} = \begin{cases} Y_{d,ij} U_{d,i} & i \neq j \\ \sum_{j=1}^n Y_{d,ij} U_{d,j} + 2U_{d,i} Y_{d,ii} - D_i & i = j \end{cases} \quad (7)$$

通过计算可获得修正后各直流节点电压参考值 $U_{d,i}^*$ 和有功功率参考值 $P_{d,i}^*$ 为:

$$\begin{cases} U_{d,i}^* = U_{d,i} \\ P_{d,i}^* = P_{d,i} \end{cases} \quad (8)$$

3 交直流潮流计算

交直流电网主要通过 VSC 实现互联, VSC 是连接交直流电网的主要设备, 也是实现潮流控制的关键, 本文以 VSC 为计算边界, 采用交直流解耦交替迭代法实现潮流计算^[12]。对于 VSC 的静态等值

模型见图 2, 忽略换流器电抗器电阻以及系统谐波分量。图中: i 为第 i 个换流器; $U_{c,i} \angle \theta_{c,i}$ 为换流器输出的基波电压相量; $U_{s,i} \angle \theta_{s,i}$ 为换流器与交流系统连接节点处的电压相量; $X_{c,i}$ 为换流器等效阻抗; $R_{c,i}$ 为换流器损耗等效电阻; $P_{c,i}$ 和 $Q_{c,i}$ 分别为交流系统流入换流器的有功和无功功率; $P_{s,i}$ 和 $Q_{s,i}$ 分别为直流对交流网络的注入有功和无功功率; $R_{c,i}$ 和 $X_{c,i}$ 分别为换流器侧电阻和电抗; $R_{d,i}$ 为直流侧电阻。

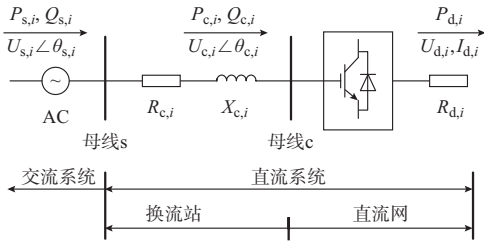


图 2 VSC 稳态物理模型
Fig. 2 Steady state model of VSC

对含多端柔性直流的交直流混合系统潮流计算方程统一表示为:

$$\begin{cases} f_{ac}(x) = 0 \\ f_{dc}(x) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $f_{ac}(\cdot)$ 表示交流电网节点功率方程, 计算节点包括纯交流节点及与 VSC 相连节点; $f_{dc}(\cdot)$ 表示包含换流器功率方程, 潮流方程的详细表达式参见附录 A 式(A1)和式(A2)。

对直流系统求解时, 将交流系统对 VSC 交流母线侧的母线电压及功率注入作为已知量处理, 采用牛顿拉夫逊算法进行迭代求解。对交流系统求解时, VSC 交流母线按直流系统控制模式相应设定为 PQ 或 PV 节点, 由直流潮流方程计算边界节点功率注入量并修正 PQ 和 PV 节点设定值, 采用动态潮流法进行计算。校验交流系统和直流系统在 VSC 交流母线的功率偏差, 如小于允许误差, 则退出交直流交替迭代计算。

4 算例分析

本文以在建的张北柔性直流电网接入华北交流电网构建交直流混联系统模型, 采用真双极主接线形式, 按环网结构连接康保、张北、丰宁和北京换流站, 网络架构见附录 A 图 A1。其中, 送端康保换流站和张北换流站为新能源汇集换流站, 将清洁能源通过直流网络向交流网络输送; 受端丰宁换流站和北京换流站通过交流线路分别接入华北电网金山岭站和昌平站。直流系统模型的换流器设备参数和线路参数如附录 A 表 A1 和表 A2 所示, 为简化计算,

模型中忽略换相电阻和滤波器电抗。根据所建直流电网模型连接方式, 柔性直流系统采用下垂控制模型, 四端换流站都可以参与极间转代控制, 北京和丰宁站参与站间功率协调控制, 见附录 A 表 A3。交流电网为华北实际模型, 计算规模为 8 716 个计算节点、4 043 条线路、6 842 条变压器支路。

4.1 换流站双极闭锁

本文模拟了直流系统双极故障, 分析其对交直流电网运行状态的影响。以张北站双极闭锁为例, 在发生闭锁后, 该站功率将由康保站向柔性直流网络输送功率, 丰宁站及北京站共同承担功率损失并降功率运行, 换流站直流转代功率如表 1 所示, 直流网络各支路潮流结果如表 2 所示。

表 1 张北换流器双极闭锁直流网络潮流计算结果
Table 1 Calculation results of power flow based on bipolar blocked DC network in Zhangbei converter station of China

换流厂站	换流极	故障前		故障后	
		功率/MW	直流电压/kV	功率/MW	直流电压/kV
张北	正	1 500	501.296 3	0	500.385 4
	负	1 500	501.291 0	0	500.390 6
康保	正	750	501.225 4	750.0	500.498 3
	负	750	501.230 6	750.0	500.485 1
北京	正	-1 500	499.999 5	-499.2	499.999 5
	负	-1 500	499.999 5	-499.2	499.999 5
丰宁	正	-750	500.220 0	-251.1	500.115 0
	负	-750	500.222 6	-251.1	500.109 8

表 2 张北换流器双极闭锁直流网络支路潮流计算结果
Table 2 Calculation results of branch power flow based on bipolar blocked DC network in Zhangbei converter station of China

首端换流厂站	末端换流厂站	换流极	故障前支路潮流/MW	故障后支路潮流/MW
张北	康保	正	236.906	-374.613
		负	240.632	-380.422
张北	北京	正	1 263.000	375.491
		负	1 259.330	381.313
康保	丰宁	正	986.862	375.491
		负	990.530	369.463
丰宁	北京	正	234.800	123.072
		负	238.471	117.294

由计算结果可知, 在张北双极闭锁后, 注入直流网络功率小于从直流网络中吸收的功率, 各节点电压小幅降低, 直流线路功率出现较大转移, 本文方法在计算结果中体现了柔性直流电网控制的影响。

张北双极闭锁导致送端有 3 000 MW 功率无法送出, 相应地引起交流电网出现 3 000 MW 功率缺额, 造成系统发电机、负荷一次调频动作。本文采用动态潮流对缺失的大功率进行模拟计算, 其中发电机、负荷的频率特性调节系数标幺值分别取为 30 和 2。故障后, 交流电网通过发电机增发出力, 切除负

荷补偿送端换流站双极闭锁的功率缺额,其频率及功率变化情况如图3和图4所示。

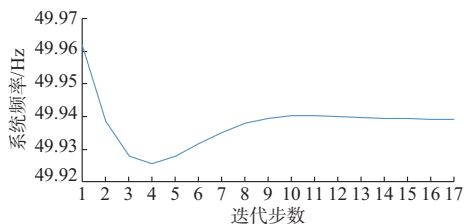


图3 交流电网频率变化
Fig.3 Frequency change of AC grid

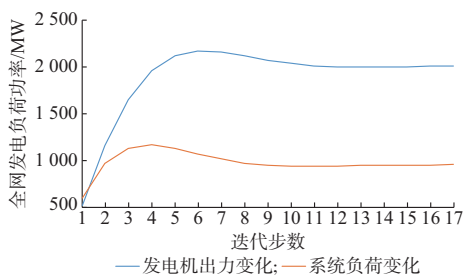


图4 交流系统发电及负荷变化
Fig.4 Changes of power generation and load in AC system

4.2 换流站单极闭锁

本文对丰宁换流站单极闭锁模拟计算结果见表3,丰宁换流站发生单极闭锁故障,通过极间和站间功率协调,在满足直流网络安全约束条件下,确保送端功率的正常送出,直流电网下电网总功率保持不变,由丰宁换流站负换流极转代500 MW下网功率,北京换流站转代250 MW的下网功率。在此情况下,北京换流站下网功率达到了3250 MW,造成了近区昌顺一线和昌顺二线线路潮流越限见表4。

表3 丰宁换流站单极闭锁直流网络潮流计算结果

Table 3 Calculation results of power flow based on unipolar blocked DC network in Fengning converter station of China

换流厂站	换流极	不考虑功率转代/MW	考虑功率转代/MW
张北	正	1 500	1 500.00
	负	1 500	1 500.00
康保	正	750	750.00
	负	750	750.00
北京	正	-2 250	-2 250.00
	负	-1 500	-997.45
丰宁	正	0	0
	负	-750	-1 251.54

表4 丰宁换流站单极闭锁线路越限扫描结果

Table 4 Scan results of overload based on unipolar blocked DC network in Fengning converter station of China

线路名称	故障前潮流/MW	N-1故障后潮流/MW	限值/MW
昌顺一线	1 777.62	1 868.49	1 800
昌顺二线	1 777.62	1 868.49	1 800

由计算结果可以看出,静态安全分析中考虑了交直流电网故障后的各种变化因素的影响,基本可以模拟交直流电网状态变化情况,计算结果更加符合实际电网运行变化特征。

4.3 直流线路N-1故障

针对直流线路N-1故障进行模拟计算,表1给出直流系统中负载最重张北—北京正极直流线路故障后的结果。张北—北京正极直流线路故障时,正极直流环网解开,直流功率涌向康保—丰宁线路,造成该线路2250 MW过负荷运行;在不考虑功率转代情况下,为满足直流网络的正常运行,将需要投入耗能装置,实现正极网络降功率250 MW运行,导致直线下电网功率降低。考虑功率转代后,由负极网络通过极间转代约250 MW故障功率,并通过装设有下垂控制模式的丰宁和北京换流站实现双极网络功率平衡。在考虑直流转代后,静态安全分析的结果更加接近实际电网运行条件。直流网络各支路潮流结果见表5。

表5 张北—北京正极直流线路故障计算结果

Table 5 Calculation result of fault in Zhangbei—Beijing positive pole of DC line

换流厂站	换流极	不考虑功率转代/MW	考虑功率转代/MW
张北	正	1 250	1 251.00
	负	1 500	1 748.50
康保	正	750	750.00
	负	750	750.00
北京	正	-1 250	-1 331.79
	负	-1 500	-1 663.13
丰宁	正	-750	-668.70
	负	-750	-834.37

5 结语

本文在研究含VSC的多端柔性直流电网工作原理及控制方式基础上,提出多端柔性直流互联的交直流混联电网静态安全分析方法,从预想故障定义构建、交直流预想故障快速扫描和安全评估方面阐述了功能的实现方法,并针对静态安全分析计算的准确性提出了具体解决方案,直流电网考虑换流站内极间转代及换流站间功率协调控制影响,交流电网面临大功率缺失下的负荷发电频率特性,通过算例仿真验证表明本文方法计算结果能较好地反映实际电网故障后运行状态变化情况,为调度运行人员进行风险预警提供参考依据。本文方法可直接基于现有静态安全分析实现并直接应用于调度系统。

交直流混联电网的静态安全分析研究是一个系统性课题,本文侧重于对静态安全分析的功能架构方面研究,作者在后续研究中会进一步考虑直流系

统故障后协调控制动作逻辑的静态建模研究, 进一步提高静态安全分析计算准确性。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [2] 汤广福, 罗湘, 魏晓光, 等. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang, et al. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [3] 许洪强, 姚建国, 於益军, 等. 支撑一体化大电网的调度控制系统架构及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 1-8. DOI: 10.7500/AEPS20170617001.
XU Hongqiang, YAO Jianguo, YU Yijun, et al. Architecture and key technologies of dispatch and control system supporting integrated bulk power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 1-8. DOI: 10.7500/AEPS20170617001.
- [4] 许洪强, 姚建国, 南贵林, 等. 未来电网调度控制系统应用功能的新特征[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(1): 1-7. DOI: 10.7500/AEPS20170518001.
XU Hongqiang, YAO Jianguo, NAN Guilin, et al. New features of application function for future dispatching and control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 1-7. DOI: 10.7500/AEPS20170518001.
- [5] 徐政, 屠卿瑞, 管敏渊, 等. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 128-141.
XU Zheng, TU Qingrui, GUAN Minyuan, et al. HVDC-flexible system[M]. Beijing: China Machine Press, 2014: 128-141.
- [6] 任敬国, 李可军, 刘合金, 等. 基于改进定有功功率控制特性的VSC-MTDC系统仿真[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 133-139.
REN Jingguo, LI Kejun, LIU Hejin, et al. Coordinated control strategy of VSC-MTDC system based on improved DC voltage-active power characteristic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 133-139.
- [7] 阎发友, 汤广福, 贺之渊, 等. 基于MMC的多端柔性直流输电系统改进下垂控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 397-404.
YAN Fayou, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. An improved droop control strategy for MMC-based VSC-MTDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 397-404.
- [8] 喻锋, 王西田, 解大. 多端柔性直流下垂控制的功率参考值修正方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 397-404.
YU Feng, WANG Xitian, XIE Da. Power reference correction method for droop control of VSC-MTDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 397-404.
- [9] 吴金龙, 刘欣和, 王先为, 等. 多端柔性直流输电系统直流电压混合控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1593-1599.
WU Jinlong, LIU Xinhe, WANG Xianwei, et al. Research of DC voltage hybrid control strategy for VSC-MTDC system[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1593-1599.
- [10] 何炎, 李周, 李亚州, 等. 基于真双极接线的VSC-MTDC系统功率转代策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(19): 95-101. DOI: 10.7500/AEPS20170327009.
HE Yan, LI Zhou, LI Yazhou, et al. Power conversion strategy of VSC-MTDC system based on real bipolar wiring mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 95-101. DOI: 10.7500/AEPS20170327009.
- [11] 李超, 胡文旺, 唐志军, 等. 对称双极柔性直流输电系统功率转带控制策略[J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2173-2180.
LI Chao, HU Wenwang, TANG Zhijun, et al. Control strategy of power transfer in bipolar HVDC flexible transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2173-2180.
- [12] 郑超, 周孝信, 李若梅, 等. VSC-HVDC稳态特性与潮流算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 1-5.
ZHENG Chao, ZHOU Xiaoxin, LI Ruomei, et al. Study on the steady characteristic and algorithm of power flow for VSC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 1-5.
- [13] BEERTEN J, COLE S, BELMANS R. Generalized steady-state VSC-MTDC model for sequential AC/DC power flow algorithms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 821-829.
- [14] 王建明, 李传栋, 印永华. 基于接口修正方程的含柔性直流大电网解耦潮流算法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 73-77.
WANG Jianming, LI Chuandong, YIN Yonghua. Decoupled power flow algorithm for large power grid with flexible DC based on interface correction equation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 73-77.
- [15] BARADAR M, CHANDHARI M. A multi-option unified power flow approach for hybrid AC/DC grids incorporating multi-terminal VSC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2376-2383.
- [16] 柴润泽, 张保会, 薄志谦. 含电压源型换流器直流电网的交直流网络潮流交替迭代方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 8-13.
CHAI Runze, ZHANG Baohui, BO Zhiqian. Alternating iterating power flow algorithm for hybrid AC/DC networks containing DC grid based on voltage source converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 8-13.
- [17] 杨堤, 程浩忠, 姚良忠, 等. 基于电压控制特性的电压源型多端直流/交流系统潮流求解[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(6): 42-48.
YANG Di, CHENG Haozhong, YAO Liangzhong, et al. Power flow solving of VSC multi-terminal DC/AC system based on voltage control characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(6): 42-48.
- [18] CHAI Runze, ZHANG Baohui, DOU Jingming, et al. Unified power flow algorithm based on the NR method for hybrid AC/DC grids incorporating VSCs[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 4310-4318.
- [19] 李传栋, 王建明, 印永华. 含多端柔性直流的大电网潮流联立计算方法研究[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1025-1029.
LI Chuandong, WANG Jianming, YIN Yonghua. Research of power flow simultaneous algorithm for power system with VSC-MTDC[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1025-1029.

[20] 肖峻,郭伟,李蕴,等. 分区柔性互联城市电网的静态安全性分析[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3141-3146.

XIAO Jun, GUO Wei, LI Yun, et al. Security assessment on urban power network with partitioned flexible interconnection [J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3141-3146.

[21] 孙宏斌,李钦,张伯明,等. 基于动态潮流方程的连续潮流模型与方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 77-82.

SUN Hongbin, LI Qin, ZHANG Boming, et al. Continuation power flow method based on dynamic power flow equation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 77-82.

研究方向: 调度自动化分析与控制。E-mail: menggongliyan@163.com

滕云(1973—),男,教授,博士生导师,主要研究方向: 可再生能源发电、多能源系统优化运行与控制。E-mail: tengyun@sut.edu.cn

冷欧阳(1986—),女,主要研究方向: 电网规划。E-mail: 175881948@qq.com

王毅(1980—),男,通信作者,高级工程师,主要研究方向: 调度自动化分析与控制。E-mail: wongyee@outlook.com

李岩(1980—),男,博士研究生,高级工程师,主要研

(编辑 鲁尔姣)

Static Security Analysis of AC/DC Power System with Multi-terminal Flexible DC

LI Yan^{1,2}, TENG Yun¹, LENG Ouyang², WANG Yi^{3,4}, LU Juanjuan^{3,4}

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. State Grid East Mongolia Electric Power Supply Co. Ltd., Hohhot 010010, China;

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

4. NARI Technology Co. Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: The work principle and control mode of the multi-terminal DC system with voltage source converter (VSC-MTDC) are essentially different from the conventional DC system. The current static security analysis cannot directly analyze and calculate the AC/DC system with VSC-MTDC. Firstly, a calculation framework for AC/DC static security analysis of VSC-MTDC/AC hybrid system is proposed based on the traditional static security analysis of AC system, the adopted functional realization method and key technologies are described. Then, in the calculation of expected faults, the change of operation conditions of AC and DC power grids is taken into account to ensure that the calculation results are consistent with the actual operation conditions of power grids, which improves the accuracy of static security analysis and calculation. Finally, hybrid AC/DC system with four-terminal flexible DC system is established to verify the efficiency and practicability of the proposed method.

Key words: multi-terminal direct current; voltage source converter; hybrid AC/DC power system; static security analysis