

DOI: 10.7667/PSPC150691

多馈入交直流混联受端电网直流接入能力研究评述

李兆伟¹, 翟海保², 刘福锁¹, 黄志龙², 崔晓丹¹, 李威¹

(1. 南京南瑞集团公司, 江苏 南京 211000; 2. 国家电网公司华东分部, 上海 200120)

摘要: 受端电网的直流接入能力是大规模交直流混联电网调度运行部门越来越关注的问题。从直流多馈入交直流混联电网后面临的主要问题出发, 分析了影响受端电网直流接入能力的主要因素, 对现有直流及新能源接入能力研究方法进行总结。分析了各方法的优缺点, 探讨了受端电网直流接入能力的计算方法及未来的研究方向。受端电网直流接入能力是一个多目标优化问题, 下一步研究重点是建立系统的优化模型, 科学化、实用化地评估受端电网直流接入能力。针对限制受端电网直流接入能力的主要因素, 提出了提高电网直流接入能力的相关建议。

关键词: 高压直流输电; 多馈入系统; 直流接入能力; 多馈入短路比

DC access capability study for multi-infeed HVDC power transmission system

LI Zhaowei¹, ZHAI Haibao², LIU Fusuo¹, HUANG Zhilong², CUI Xiaodan¹, LI Wei¹

(1. NARI Group Corporation, Nanjing 211000, China;

2. East Subsection of State Grid Corporation of China, Shanghai 200120, China)

Abstract: DC access capability for multi-infeed HVDC power transmission system is an important issue which gets power companies concerned greatly. From the problems caused by large scale multi-infeed HVDC, the main limiting factors of DC access capability are analyzed and the current researches on DC and new energy access capability are summarized. Based on these the calculation method and the next research directions of DC access capability are discussed. DC access capability is a multi objective optimization problem, and the next key study is to build the system optimal model to evaluate the DC access capability of multi-infeed HVDC power transmission system. For the main limiting factors the suggestions to improve DC access capability and optimize the layout of multi-infeed HVDC are proposed.

Key words: HVDC power transmission; multi-infeed system; DC access capability; multi-infeed short circuit ratio

0 引言

高压直流(HVDC)输电以其独特的优点已成为国内大区互联和远距离大容量输电的重要形式, 为我国大范围资源优化配置发挥了重要作用。随着电网的不断发展建设, 多回直流落点同一交流受端电网不可避免, 我国南方电网和华东电网均已发展成为典型的直流多馈入受端电网, 直流馈入容量不断增长。以华东电网为例, 截至 2014 年底, 共有 7 回直流接入, 其中包括 3 回±800 kV 的特高压直流, 直流输送总容量达到 3 176 万千瓦。按照规划^[1-2], 预计到 2020 年, 华东电网还将新建 4 回特高压直流, 如此巨大的直流输电容量下电网能否安全稳定运行,

是电力生产运行和科研单位非常关注的问题^[1]。

为了更好地指导电网建设和维护受端电网安全稳定, 必须研究解决一个关键问题, 即如何评估受端电网接受直流馈入功率的能力, 包括电网允许馈入的功率总量, 应遵循什么原则选择直流落点才能有效提高受端电网的直流受电能力等。这些问题已经成为大电网规划和设计中亟待解决的关键技术问题。影响电网直流受电能力的因素很多, 在实际电网生产运行中, 电网调峰能力、直流近区潮流疏散能力、局部电网电压稳定、系统频率安全、电网暂态动态稳定特性、多直流交直流交互影响特性等等, 均会对电网的直流接入能力造成限制^[3-9]。

目前有关受端电网直流接入能力的研究较少, 相关文献多是从影响直流输送能力的单一限制因素着手, 研究分析相关限制因素影响直流送电的机理及特性, 如从短路比的角度研究多直流间的交互影

基金项目: 国家电网公司科技项目“特高压直流连续换相失败、再启动工况下安全稳定控制技术研究”

响特性, 研究交直流混联系统电压稳定的分析方法等。为了更好地探寻受端电网直流接入能力的研究方法, 本文综合分析了国内外在多馈入直流接入能力方面的研究现状, 以及风电等新能源接入能力方面的研究成果, 旨在推动解决受端电网直流接入能力计算这一实际问题。

1 影响受端电网直流接入能力的限制因素

我国华东电网和南方电网已分别形成了多直流馈入的网架格局, 随着西电东送工程的实施, 未来将有更多直流系统落点这些地区, 与国外多馈入直流系统相比, 直流逆变站落点更为密集, 直流功率占地区负荷比例更大。目前, 电网中已遇到影响直流接入能力的实际问题, 如电网低谷负荷下调峰困难、局部电网静态电压的区域负荷有功裕度^[10]不足、多直流闭锁后的系统频率跌落、直流落点近区的潮流疏散困难、多直流同时换相失败带来的稳定特性恶化, 这些都是电力生产运行单位在大规模直流馈入电网后面临的棘手问题, 下面将结合现有研究文献进行详细阐述。

1.1 电网调峰约束

负荷峰谷差大是我国电网运行长期面临的困难, 直流的大量接入对于缓解电网高峰负荷下电力不足发挥了重要作用, 显著减少了电网拉闸限电次数。为响应国家政策充分消纳清洁水电能源, 避免、减少直流送端电厂弃水, 目前输送水电的直流在夏季丰水期长时间满功率运行, 受端电网负荷低谷方式下常规机组出力限制严重, 系统调峰困难。以华东电网为例, 目前接入华东电网的 7 回直流送端配套电源全部为水电, 低谷负荷方式下输送的 3176 万千瓦直流电力基本不参与电网调峰, 电网调峰压力非常大, 特别是对上海等直流落点集中地区, 单纯依靠调减上海本地机组很难解决低谷负荷方式下的调峰缺口, 机组长时间运行在最小建议出力水平上, 电网运行风险较大, 需要全网机组进行调峰支援。随着特高压直流的进一步建设, 新能源及核电机组大量投产, 华东电网的调峰形势将更为严峻。

电网低谷负荷下调峰能力不足是当前环境下限制直流接入能力的一个重要因素, 建议开展直流参与电网调峰研究, 合理建设电网调峰电源, 采取有力措施降低电网峰谷差, 可以显著提高受端电网的直流接入能力。

1.2 受端交流电网强度约束

传统的直流输电系统是基于晶闸管器件建立的, 其换相过程需要受端交流电网提供换相电压和电流, 由逆变器的工作原理可知, 直流系统的换相

电流实际上是交流系统的相间短路电流, 要保证换相可靠, 受端交流系统必须有足够的容量, 即受端交流系统必须足够“强壮”。在理论研究和工程应用中, 国内外研究学者为评估交流系统对直流系统的支撑能力及交直流相互影响程度, 提出了一些评估方法和指标。

针对单一直流, 国外电力专业学者定义了短路比(Short Circuit Ratio, SCR)概念来衡量交流系统的相对强度^[4], 其定义为被考察节点处的短路容量与直流系统额定输送容量的比值。

$$SCR = \frac{S_{ac}}{P_{dn}} \quad (1)$$

式中, S_{ac} 为直流换流母线的系统短路容量; P_{dn} 为直流的额定输送容量。SCR 给出了交流系统的固有强度, 应用该指标可以评估直流系统投入后对系统运行影响的大小。短路比指标越大, 表明直流系统投入或运行状态变化对交流系统影响较小。

为了排除换流站交流滤波器及电容器等无功补偿设备的影响, 在 SCR 基础上, 进一步定义了有效短路比(Effective Short Circuit Ratio, ESCR)指标^[4]。SCR 和 ESCR 通常作为电力系统规划和运行控制中衡量交直流系统相对强弱关系的评估指标, 为了应用上述指标指导直流系统规划运行, 文献[4]通过直流输送功率特性计算临界短路比, 利用相关指标大小对交流系统强度进行了分级, 考虑一定裕度后划分如下: ESCR 大于 3, 为强系统; ESCR 在 2~3 之间, 为弱系统; ESCR 小于 2, 为极弱系统。

随着直流输电的快速发展, 电力研究学者面临着多回直流落在同一个交流系统中时如何评价受端交流系统的“强壮性”, 为避免结果偏于乐观, 必须考虑各回直流间的相互影响, 建立直流多馈入情况下的评价指标^[11-16]。Paulo Fisher 最先提出了多馈入短路比(Multi-Infeed Short Circuit Ratio, MSCR)的概念^[11], 他利用直流落点换流站母线之间电气距离评估多回直流的相互耦合关系, 指标的表达式为

$$MSCR_n = \frac{1}{\sum_{m=1}^k P_{dm} \times z_{n,m}} \quad (2)$$

式中: $z_{n,m}$ 为第 m 回和第 n 回直流系统逆变站节点看出去端口等值阻抗矩阵中对应的元素; k 为接入直流的总条数。

2006 年国际大电网组织(CIGRE)成立工作组基于 Paulo Fisher 对 MSCR 的定义, 提出了多馈入相互作用因子(Multi-infeed interaction factor, MIIF)的概念, 用于评估多直流馈入系统各换流母线电压之间的相互作用程度, 其定义为^[12]: 当所考察的直流

输电系统以额定直流功率运行时,在其逆变站换流母线上投入一个并联无功负荷,使其造成该换流母线电压约1%的阶跃跌落(用 ΔU_n 表示),计算其他逆变站换流母线电压变化百分数 ΔU_m ,将 ΔU_n 和 ΔU_m 的比值记为逆变站 n 对逆变站 m 的相互作用因子 $MIIF_{m,n}$ 。基于 $MIIF$, CIGRE工作组发布了多馈入短路比的定义为

$$MSCR_n = \frac{S_{acn}}{P_{dn} + \sum_{m=1, m \neq n}^k \frac{\Delta U_m}{\Delta U_n} P_{dm}} \quad (3)$$

同样,与单一直流的短路比相似,在相应直流的换流母线上考虑并联无功补偿的影响,可定义多馈入有效短路比(Multi-Infeed Effective Short Circuit Ratio, MESCR)。

文献[13]通过推导证明了式(2)和式(3)两种多馈入短路比公式的意义是基本一致的,通过计算多馈入临界短路比推荐了多馈入交直流系统强弱的指标如下:1)极弱系统, $MSCR < 2$ 或 $MESCR < 1.5$; 2)弱系统, $2 < MSCR < 3$ 或 $1.5 < MESCR < 2.5$; 3)强系统, $MSCR > 3$ 或 $MESCR > 2.5$ 。

针对同时存在整流站和逆变站的多直流馈入系统,文献[14]指出逆变站附近的整流站有助于提高该直流逆变站的短路比,进而提高该直流最大运行功率,降低暂态过电压程度,减小直流换相失败概率。

短路比和多馈入短路比指标为受端交流电网强度与直流接入容量搭建了联系的桥梁,通过计算量化指标评价交流电网内直流接入方案的合理性,评价的内容可以包括直流落点的位置、直流接入的容量等,当受端电网中至少存在一条直流的(多馈入)短路比达到临界值时,则系统中所有直流的容量之和即为交流电网强度约束下的受端电网直流接入能力。

1.3 受端电网电压稳定约束

直流输电系统运行时,换流器需要消耗大量的无功功率,大约占直流输送有功的40%~60%,正常运行条件下,这些无功功率主要由交流滤波器、电容器等静态无功补偿装置提供,当交流系统发生故障导致系统电压跌落时交直流系统的一系列响应会恶化受端交流系统的电压稳定性^[17]。对于多馈入直流系统,交流系统的某个故障可能导致多个换流器相继或同时换相失败,使系统出现较大的功率缺额,系统电压稳定问题将更加突出和复杂。

随着多直流馈入受端电网的容量越来越大,电网常需配合关停相当部分的机组,这进一步削弱了

交流系统的电压支撑能力,会恶化系统的电压稳定性。实际电网中发现机组小开机恶劣方式下,局部电网存在静态电压稳定负荷有功裕度不足的情况,已引起电力生产运行单位重视。

目前,国内外在交直流系统电压稳定分析上基本沿用了纯交流系统的静态分析方法^[18-25]。文献[21]利用电压稳定因子(Voltage Stability Factor, VSF)分析了受端交流系统的电压/功率静态稳定特性。文献[22]采用特征值方法分析单馈入直流系统的电压稳定性,文献[23]将其扩展到多馈入直流系统中。文献[24]将最大直流功率曲线法(Maximum Power Curve, MPC)推广到多馈入直流系统中,针对特定的系统分析了各直流子系统对系统电压稳定性的影响,得到了多馈入直流最大功率曲线。文献[25]将崩溃点法用于交直流系统电压稳定性的研究。上述这些方法忽略了交流和直流系统动态过程,但这类分析方法计算快捷、简单、易于掌握,为克服交直流系统静态电压稳定分析法的不足,国内外学者基于动态最大功率曲线法、分岔理论、时域仿真、暂态能量法等对交直流系统的动态电压稳定问题展开了研究。文献[26]对常规直流和柔性直流共存交流系统的电压稳定特性开展了研究分析,指出柔性直流可以改善常规直流带来的电压稳定问题,其电压支撑能力与直流输送容量及与常规直流的电气距离有关,为提高电网暂态电压稳定特性,提出一种电网故障后的电压调整方式,可在柔性控制系统的电压外环控制中引入电压增量成分。

需要指出,目前直流多馈入的受端交流电网多属于较强壮的电网,电压稳定一般属于局部问题,通过电压稳定分析可以对局部电网的直流接入能力进行限制。

1.4 系统频率跌落约束

当直流送端系统与受端系统不在一个同步电网中时,必须考虑直流线路闭锁故障对送端系统和受端系统频率的影响。文献[27]提出了将频率偏差因子作为衡量交流系统接纳直流能力的频率强度指标,频率偏差因子越大,表示系统的频率支撑能力越强。

交流系统保持频率的能力取决于这个交流系统的转动惯量,为有满意的性能,交流系统必须有一个相对于直流系统规模的最小转动惯量。文献[4]提出用有效直流惯性常数作为相对转动惯量的衡量,其定义如下:

$$H_{dc} = \frac{\text{交流系统的总转动惯量, MW} \cdot \text{s}}{\text{直流通路额定传输容量, MW}} \quad (4)$$

为使系统安全稳定运行, 要求有效惯性常数至少为 2~3 s。究其实质, 指标的意义在于(全部直流功率损失后)避免频率跌落超过 5%。

频率是系统性的指标, 按系统频率指标约束可以给出全网接纳直流能力, 但考虑所有直流功率同时损失超出现有导则的故障考核标准, 相关指标还存在继续深入探讨的空间。

1.5 多直流换相失败约束

换相失败是逆变器的常见故障, 其根本原因是逆变侧的换流阀承受反向电压的时间小于去游离、恢复阻断能力所需的时间, 使得本应从导通进入截至状态的换流阀重新导通。引发换相失败的因素很多, 电力系统研究学者主要关注交流故障造成的直流换相失败。已有的研究表明, 在直流多馈入系统中, 发生交流系统故障可能造成多回直流同时换相失败, 实际系统中也多次发生交流故障造成多回直流同时换相失败的事^[28-31]。

多直流换相失败的预测多依赖于时域仿真, 文献[32]提出了换相失败免疫因子(CFII, Commutation Failure Immunity Index)来评估直流单馈入以及多馈入系统对换相失败的灵敏度。换相失败免疫因子的计算需要通过电磁仿真, 且所需的计算时间也比较长, 文献[33]在此基础上提出了一种快速的 CFII 计算方法, 该方法可以应用于不同短路比的单馈入系统和多馈入系统。文献[34]则提出一种临界多馈入影响因子分析直流换相失败可能性的方法。

当直流送端系统与受端系统不在一个同步电网中时, 由于目前多直流馈入的交流受端电网通常较强, 发生多回直流同时换相失败后直流功率仅短时损失, 交流故障消除后直流功率均可快速恢复, 一般不会造成受端电网暂态稳定破坏。但若直流接入规模进一步增大, 需滚动校核多直流同时换相失败对受端电网安全稳定性的影响。

当直流送端系统与受端系统在同一个同步电网中时, 由于存在交直流并联运行通道, 直流换相失败后, 潮流会通过交流通道进行转移, 研究发现, 直流长时间换相失败后可能会引起交流系统暂态功角稳定问题。多直流同时换相失败的影响可以作为受端电网直流接入能力的校核因素之一。

为应对这种新的故障冲击形式, 一方面大量电力系统专家从预防直流换相失败开展了相应的工作^[35-37], 文献[35]提出一种基于逆变器换相失败预测控制环节的直流电流设置方法以提高换相失败控制环节的有效性, 进而抑制直流发生换相失败。文献[36]则提出一种基于故障限流器的电网动态分区技术, 通过分区阻碍电网故障传播, 降低直流换相

失败概率, 提高直流恢复速度。文献[37]进一步提出直流分区的概念, 利用直流异步联网阻隔故障传播。另一方面则从直流换相失败后的电网稳定控制角度开展研究, 直流发生换相失败后触发稳定控制切机已成功应用到实际现场, 同时国内电力系统专家正在研究直流多次连续换相失败后闭锁直流的相关标准, 以应对多回直流同时换相失败可能给直流送端和受端带来的暂态稳定问题, 这与目前直流系统配置的换相失败保护策略相比有较大不同: 目前天广直流配置的换相失败保护的动作为原理为, 保护在 3.5s 检测到 150 次换相失败时请求控制系统切换, 保护在 3.5 s 检测到 260 次换相失败则动作闭锁直流。对受端电网来说, 直流同时闭锁的风险变大, 受端系统的频率和电压安全更为严峻, 亟需研究受端电网直流接入能力。

2 电网直流接入能力的计算方法

目前, 受端电网直流接入能力的研究较少, 在实际工作中, 通常由规划设计人员根据送受电需求并结合经验, 首先以测试的方式确定出直流馈入数量和每条直流的输电容量, 在此基础上, 制定有限数量的多直流落点方案, 再经过反复的安全稳定计算分析, 对不同多直流落点方案比较并确定出满足安全性要求的直流落点方案, 通过反复调整直流落点和每条直流的输电容量, 最终统计出电网的直流受电规模。

受端电网多馈入直流后, 由于直流之间的相互影响, 会导致原单条直流的短路比下降, 当多馈入短路比下降至一定程度后会影响到直流系统的正常运行, 进而对交流受端电网安全稳定运行造成影响。理论上, 按照短路比的定义及对交直流系统强弱的分级标准, 可以根据短路比和多馈入短路比指标, 不断增加直流接入容量, 给出了各直流的接入容量最大值, 进而给出受端电网直流接入能力, 但实际上直流系统的接入容量要受到直流系统的电压等级、输送距离及设备制造能力的限制, 一味增大与实际不符。另一方面, 受端交流电网强度除了与直流输送容量有关, 还与直流落点处的短路容量相关, 仅在现有直流落点增加直流容量, 会导致计算给出的直流接入能力偏保守, 因此计算受端电网直流接入能力时应考虑综合直流合理的输送容量及直流落点的优化选择。

电网低谷负荷方式下调峰能力不足是近年来我国直流多馈入电网面临的主要困难, 究其根本是由丰水期直流不参与电网调峰造成的。调峰约束下的直流接入能力计算模型较为常规, 确定低谷负荷、

峰谷差、系统强迫出力、电网调峰能力等边界条件后即可给出。此外,受端电网直流接入能力还需要考虑系统电压稳定、频率安全、暂态稳定等约束。

文献[38]提出一种综合多直流落点地区交流系统直流最大受电规模的计算方法,其核心为通过短路电流计算确定若干个备选直流落点方案,然后根据不同方案下多馈入短路比进行直流落点方案优选,增加新增直流的容量直至多馈入短路比达到临界值,进行安全稳定校核,满足安全稳定约束的直流接入规模作为电网的最大馈入规模。该方法考虑直流落点方案的影响,在满足相关约束的前提下增加新增直流容量直至达到短路比临界值,可以给出短路比指标约束下受端电力直流接入能力,但考虑因素还不够全面,给出的结果可能偏乐观。文献[39]从直流多馈入短路比出发,分析了影响直流受入规模的主要因素,考虑网架结构优化、直流落点优化和动态无功补偿配置优化,采用启发式规划算法求取最大直流受入规模,该方法在增加直流接入时是基于固定网架考虑一些优化措施,并未考虑电网自身的发展变化,计算得到的结果可能与实际存在较大偏差。

研究电网接纳新能源能力与电网接纳直流的能力有相似之处^[40-43],风电接纳能力主要有两个大的研究方向,一是从调峰约束角度给出全网最大的风电接纳能力,二是根据最优潮流给出各个风场的接入容量,进而给出全网的风电接入总量。文献[42]提出一套基于系统备用需求容量和调峰能力约束的风电接纳能力评估体系,通过对电源结构、负荷特性及火电机组调峰能力的全面分析,综合考虑系统中自备容量、抽水蓄能电站和联络线计划的影响,评估电网的风电接纳能力。文献[43]从系统最优潮流入手,建立了电网风电接入能力的优化数学模型,考虑的约束包括无功补偿约束、线路热稳约束及输电断面潮流约束。风电接纳能力有其自身特点,考虑的约束因素并未超出上节中归纳的内容。

总而言之,目前的相关研究多是从直流接入后带来的问题着手,解决的是某个确定落点方案下接入一定容量直流不可行,或某几个待定方案中哪个方案较优的问题,要解决某个交流网架下最多能接纳多少直流是非常困难的问题。

3 总结与展望

随着电网规模的不断发展,受端电网馈入直流的容量越来越大,直流在为电网输送电力、缓解用电紧张的同时,也给电网运行控制带来了新的挑战。

电力生产运行单位越来越关注电网最大能接纳直流的能力有多大,电网接纳多大容量直流运行较为经济。综合来讲,受端电网直流接入能力要受到很多因素约束,诸如系统调峰能力、受端电网强度、电压稳定、频率安全、暂态稳定等。对于供电能力不足的受端电网,应能分析出影响直流接入能力的主要限制因素,通过合理规划直流落点,优化运行方式安排,强化电网结构,拓展直流辅助服务等合理措施提高电网接入直流的能力。另一方面,充分认识直流接入对电网造成的影响,合理规划,减少直流盲目建设,提高电网运行经济效益,降低系统运行风险。

受端电网直流接入能力评估是一个多目标优化问题,目前学术界还没有全面、合适的计算方法,下一步应深入探索影响直流接入能力的约束条件,建立系统的优化模型,科学化、实用化地评估电网直流接入能力。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 白建华, 闫晓卿, 程路. “十三五”电力流及电源规划方案研究[J]. 中国电力, 2015, 48(1): 15-20.
BAI Jianhua, YAN Xiaoping, CHENG Lu. Research on power flow and power source installation planning scheme during the 13th Five-Year period[J]. Electric Power, 2015, 48(1): 15-20.
- [3] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [4] KRISHAYYA P C S, ADAPA R, HOLM M, et al. IEEE guide for planning DC links terminating at AC locations having low short-circuit capacities, part I: AC/DC system interaction phenomena[R]. France: CIGRE, 1997.
- [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.
- [6] 卢睿, 潘武略, 李晓珂, 等. 多馈入直流对华东电网稳定性影响研究[J]. 华东电力, 2005, 33(11): 3-8.
LU Rui, PAN Wulue, LI Xiaoke, et al. Impacts of multi-feed HVDC on East China Power Grid stability[J]. East China Electric Power, 2005, 33(11): 3-8.

- [7] 徐政. 联于弱交流系统的直流输电特性研究之一—直流输电的输送能力[J]. 电网技术, 1997, 21(1): 12-16.
XU Zheng. Characteristics of HVDC connected to weak AC systems PART I: HVDC transmission capability[J]. Power System Technology, 1997, 21(1): 12-16.
- [8] HE Jingbo, LI Mingjie, YI Jun, et al. Research on dynamic characteristics and countermeasures of AC-DC hybrid power system with large scale HVDC transmission[C] // 2014 International Conference on Power System Technology, Chengdu, China, December 18, 2014.
- [9] PALONE F, MARZINOTTO M, REBOLINI M, et al. Impact of renewable generation on commutation failures in multi-infeed HVDC systems: a real case study[C] // 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, Birmingham, United Kingdom, 2015.
- [10] 孙士云, 束洪春, 于继来. 单相重合时序对特高压交直流并联系统暂稳影响的机理分析[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 106-113.
SUN Shiyun, SHU Hongchun, YU Jilai. Mechanism analysis of single-phase reclosure sequence's influence on ultra-high voltage AC/DC parallel system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 106-113.
- [11] DLT1172-2013 电力系统电压稳定评价导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
DLT1172-2013 the guide of power system voltage stability evaluation[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [12] PAULO P D T, BENT B, GUNNAR A. Multiple infeed short circuit ratio: aspects related to multiple HVDC into one AC network[C] // Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES, Dalian, China, 2005.
- [13] CIGRE Working Group B4.41. System with multiple DC infeed[R]. CIGRE, 2008.
- [14] 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(31): 1-8.
LIN Weifang, TANG Yong, BU Guangquan. Definition and application of short circuit ratio for multi-infeed AD/DC power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 1-8.
- [15] CHEN Xiuyu, GOLE A M, HAN Minxiao. Analysis of mixed inverter-rectifier multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1565-1573.
- [16] LIU Dengfeng, SHI Dongyuan, LI Yinhong. A new definition of short-circuit ratio for multi-converter HVDC systems[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2015, 10(5): 1958-1968.
- [17] 邵瑶, 汤涌. 多馈入直流系统交互作用因子的影响因素分析[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 794-799.
SHAO Yao, TANG Yong. Analysis of influencing factors of multi-infeed HVDC system interaction factor[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 794-799.
- [18] ZHANG Yaoyuan, DU Zhaobin. Analysis of dynamic reactive power demand characteristics of inverter stations of multi-infeed HVDC[C] // Proceedings of 2013 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Singapore, 2013: 1-5.
- [19] 徐政. 联于弱交流系统的直流输电特性研究之二—控制方式与电压稳定性[J]. 电网技术, 1997, 21(3): 1-9.
XU Zheng. Characteristics of HVDC systems to weak AC systems part II: control modes and voltage stability[J]. Power System Technology, 1997, 21(3): 1-9.
- [20] 刘明波, 程劲晖, 程莹. 交直流并联电力系统动态电压稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(16): 27-44.
LIU Mingbo, CHENG Jinhui, CHENG Ying. Dynamic voltage stability analysis of parallel AC/DC power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(16): 27-44.
- [21] DENIS L H A, ANDERSSON G. Voltage stability analysis of multi-infeed HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1309-1318.
- [22] 林伟芳, 汤涌, 卜广全. 多馈入交直流系统电压稳定性研究[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 7-12.
LIN Weifang, TANG Yong, BU Guangquan. Study on voltage stability of multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 7-12.
- [23] 李兴源, 赵睿, 刘天琪, 等. 传统高压直流输电系统稳定性分析和控制综述[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 288-300.
LI Xingyuan, ZHAO Rui, LIU Tianqi, et al. Research of conventional high voltage direct current transmission system stability analysis and control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 288-300.
- [24] 周玮, 姜汀, 胡姝博, 等. 基于两点估计法的交直流混合系统电压稳定概率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 8-13.
ZHOU Wei, JIANG Ting, HU Shubo, et al. Probabilistic assessment on voltage stability of AC/DC hybrid systems based on two-point estimate method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 8-13.
- [25] 姜臻, 苗世洪, 尚亚男, 等. 基于电压崩溃指数的极限传输容量实用计算方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 213-221.
JIANG Zhen, MIAO Shihong, SHANG Yanan, et al. Voltage collapse indices based method for practical computation of total transfer capability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 213-221.
- [26] LIU Yan, CHEN Zhe. Transient voltage stability analysis and improvement of a network with different HVDC systems[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011.
- [27] 徐政, 黄弘扬, 周煜智. 描述交直流并列系统电网结

- 构品质的 3 种宏观指标[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 1-7.
- XU Zheng, HUANG Hongyang, ZHOU Yuzhi. Three macroscopic indexes for describing the quality of AC/DC hybrid power grid structures[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 1-7.
- [28] 王晶, 梁志峰, 江木, 等. 多馈入直流同时换相失败案例分析及仿真计算[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(4): 141-146.
- WANG Jing, LIANG Zhifeng, JIANG Mu, et al. Case analysis and simulation of commutation failure in multi-infeed transmission systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4): 141-146.
- [29] 王海军, 黄义隆, 周全. 高压直流输电换相失败响应策略与预测控制技术路线分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 124-131.
- WANG Haijun, HUANG Yilong, ZHOU Quan. Analysis of commutation failure response strategies and prediction control technology in HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 124-131.
- [30] 夏成军, 杨仲超, 周保荣, 等. 考虑负荷模型的多回直流同时换相失败分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 76-81.
- XIA Chengjun, YANG Zhongchao, ZHOU Baorong, et al. Analysis of commutation failure in multi-infeed HVDC system under different load models[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 76-81.
- [31] LI Hongwei, PENG Ganrong. Simulation study on anomalous commutation failure in multi-infeed HVDC systems[C] // 2nd International Conference on Advances in Energy and Environmental Science, 2014.
- [32] RAHIMI E, GOLE A M, DAVIES J B, et al. Commutation failure analysis in multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3): 378-384.
- [33] CHEN X, GOLE A M, GUO C. A fast calculation method for the local commutation failure immunity indices in single-and multi-infeed HVDC systems[C] // AC and DC Power Transmission, 11th IET International Conference on. IET, 2015: 1-6.
- [34] XIA Chengjun, SUO Minggui, XI Liang. Analysis on commutation failure caused by AC faults in multi-infeed HVDC systems[C] // Power Engineering and Automation Conference, 2012: 1-4.
- [35] WEI Zhinong, YUAN Yang, LEI Xiao. Direct-current predictive control strategy for inhibiting commutation failure in HVDC converter[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2409-2415.
- [36] HUANG Hongyang, XU Zheng, LIN Xi. Improving performance of multi-infeed HVDC systems using grid dynamic segmentation technique based on fault current limiters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1664-1672.
- [37] CHENG Binjie, XU Zheng, XU Wei. Optimal DC-segmentation for multi-infeed HVDC systems based on stability performance[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3): 2409-2415.
- [38] 郭小江. 多直流馈入系统特性及其评估方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [39] 周勤勇, 刘玉田, 汤涌. 受端电网最大直流受入规模分析方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 770-777.
- ZHOU Qinyong, LIU Yutian, TANG Yong. Analysis method for the maximum HVDCs' capacity to receiving-end power grid[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 770-777.
- [40] 杨宏, 苑津莎, 吴立增. 基于风电功率预测的电网静态调峰能力极限研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 266-273.
- YANG Hong, YUAN Jinsha, WU Lizeng. Research of static regulation capacity limit based on wind power prediction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 266-273.
- [41] 张涛, 李家珏, 张延峰, 等. 计及电网调峰约束的风电接纳调度方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 74-80.
- ZHANG Tao, LI Jiajue, ZHANG Yanfeng, et al. Research of scheduling method for the wind power acceptance considering peak regulation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 74-80.
- [42] 孙荣富, 张涛, 梁吉. 电网接纳风电能力的评估与应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4): 70-76.
- SUN Rongfu, ZHANG Tao, LIANG Ji. Evaluation and application of wind power integration capacity in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4): 70-76.
- [43] 孙保功, 叶鹏, 邵广惠, 等. 基于非线性内点方法的风电接入能力研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(10): 23-28.
- SUN Baogong, YE Peng, SHAO Guanghui, et al. Wind power penetration limit assessment based on nonlinear interior point algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(10): 23-28.

收稿日期: 2015-06-24; 修回日期: 2015-12-25

作者简介:

李兆伟(1985-), 硕士, 工程师, 研究方向电力系统安全稳定分析与控制; E-mail: lizhaoweil@sgepri.sgcc.com.cn

翟海保(1978-), 博士, 高级工程师, 研究方向电力系统调度、运行、控制与管理; E-mail: zhai_hb@ec.sgcc.com.cn

刘福锁(1981-), 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制。E-mail: liufusuo@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 姜新丽)