

An Analysis and Summary of Quantitative Risk Assessment about Cascading Failures of Multi-Infeed Direct Current Power System

Qian Zhou¹, Yuwei Shao², Ningyu Zhang¹, Chao Zhang², Wen Wang², Sicheng Wang², Shan Gao², Xin Zhao²

¹Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing Jiangsu

²School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu

Email: syw_v@hotmail.com

Received: Dec. 1st, 2016; accepted: Dec. 19th, 2016; published: Dec. 26th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Multi-infeed DC power system plays an important role in dealing with the long-distance power transmission and the power shortage in load center. But it also may lead to the cascading failures of the relevant AC/DC systems. Firstly, this paper briefly analyzes fault causes and influence of successive eras on the basis of chain of commutation failure, DC block, transient stability after the system fault of AC/DC and recovery of DC power after commutation failure. Then, in aspect of chain of commutation failure and transient instability, the corresponding evaluation indexes and quantitative evaluation methods are analyzed and summarized. At last, combined with the latest development requirements, this paper analyzes advantages and disadvantages of different methods and makes expectation about research direction of the quantitative evaluation.

Keywords

Multi-Infeed DC, Cascading Failures, Chain of Commutation Failure, Transient Instability, Quantitative Evaluation Method

多直流馈入电网连锁故障风险量化评估分析综述

周前¹, 邵雨薇², 张宁宇¹, 张潮², 王文², 王思成², 高山², 赵欣²

文章引用: 周前, 邵雨薇, 张宁宇, 张潮, 王文, 王思成, 高山, 赵欣. 多直流馈入电网连锁故障风险量化评估分析综述[J]. 输配电工程与技术, 2016, 5(4): 53-62. <http://dx.doi.org/10.12677/tdet.2016.54008>

¹国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京

²东南大学电气工程学院, 江苏 南京

Email: syw_v@hotmail.com

收稿日期: 2016年12月1日; 录用日期: 2016年12月19日; 发布日期: 2016年12月26日

摘要

多直流馈入电网在解决电能的长距离传输和负荷中心的电力短缺问题的同时, 也可能导致所接入的交直流系统出现连锁故障问题。首先, 本文从连锁换相失败、直流闭锁、交直流系统故障后的暂态稳定问题、换相失败后直流功率的恢复四个故障阶段出发, 简要分析了各个阶段的故障原因和影响因素。然后, 针对连锁换相失败与系统暂态失稳两方面, 分析并总结了相应评估指标和量化评估方法。最后, 结合目前多直流馈入电网的最新发展要求, 分析不同方法的优劣性, 并对连锁故障风险量化评估的研究方向做出展望。

关键词

多直流馈入, 连锁故障, 连锁换相失败, 暂态失稳, 量化评估方法

1. 引言

直流输电是指先经由发电厂发出交流电, 后经过整流器转为直流电输送至受端系统, 再经过逆变器转换为交流电输送至受端电网的一种输电方式。在如今大量建设直流输电工程的情况下, 出现了多条线路同时接入有较大电能需求量的受端电网的情况, 便形成了多馈入直流输电系统(Multi-Infeed Direct Current, MIDC) [1]。目前, 我国已经初步形成了两个复杂的多直流馈入区域电网——南方电网和华东电网[2]。

多馈入直流输电系统相比于交流输电系统、单馈入直流输电系统而言, 优点在于增加了系统运行形式, 提高了电源安排灵活性, 并扩大了输送容量以及网架结构覆盖范围; 而缺点是增加了直流之间以及直流与交流之间的相互作用的复杂性, 可能引发连锁故障问题[3]。

直流之间的耦合作用可能使得多条直流出现连锁换相失败问题[4] [5]。而换相失败又可能在故障未及时切除时, 诱发直流闭锁[6]。同时, 由于交流和直流之间的相互作用, 故障易引起送受端功率的不平衡等, 导致整个系统的电压、功角和频率失稳[7]。在换相失败等直流故障恢复时, 如果无功支撑不足、恢复过快等, 亦可能再次造成一系列上述连锁故障问题, 进而影响到交流系统故障的快速恢复, 甚至对电网的安全稳定造成威胁[8]。连锁故障已经对多直流馈入电网的安全稳定运行构成威胁。

因此, 如何准确评估交直流之间以及直流之间的相互影响、有效评估多直流馈入电网连锁故障对于电网的影响, 具有较高的研究意义。本文从连锁换相失败、直流闭锁、交直流系统故障后的暂态稳定问题、换相失败后直流功率的恢复四个故障阶段出发, 全面系统的概括性分析了各个阶段的故障原因和影响因素, 并综述了相应的指标和量化评估方法, 以各类方法现有的优缺点为依托, 对多直流馈入电网的连锁故障量化评估发展方向进行展望。

2. 多直流馈入电网连锁故障原因分析

多直流馈入电网的各系统之间有复杂的相互作用关系。由于交流对直流、直流对交流、直流与直流

系统间受电气距离/耦合程度、交流系统网络结构等因素影响,单一故障导致的直流系统不正常运行状态更易蔓延至其它直流系统,引发互联系统出现问题[9] [10],成为连锁故障的重要推动因素之一,影响MIDC系统的安全稳定运行。

连锁换相失败是连锁故障的主要表现形式之一。由于MIDC系统逆变侧交流之间有较强的电气耦合关系,同时直流子系统所采取的控制策略也不尽相同,使得直流系统与其相应交流系统之间、多个直流支路之间均产生相互的耦合关系。因此,直流系统和交流系统故障均可能造成电网的连锁换相失败。

直流闭锁与换相失败具有本质差异。只有故障未及时切除时,连续或周期性的、长时间的换相失败可能被直流保护动作出口闭锁,中断故障点的直流功率传输,引发系统功率不平衡,严重时会导致系统失步,对系统稳定造成破坏,影响电网的安全稳定运行。

直流换相失败和闭锁均可能引发连锁的暂态稳定问题。1) MIDC系统中最常见的是电压失稳。当受端交流系统发生故障时,换流母线电压下降导致直流系统电压随之下降,直流电流上升;受电感效应影响,电流的增大导致直流换相过程变长、换相角增大,使功率因数降低,直流系统无功消耗增加,需求相应增加。而由于换流母线电压下降导致无功补偿装置出力降低,供应减少,形成恶性循环,最终可能导致电压崩溃。电压失稳的根本原因是电网、特别是换流母线附近的动态无功电源不足。2) 换相失败与直流闭锁也会引发交直流混联系统的功角失稳。直流系统逆变站发生换相失败时,会使直流系统输送功率大幅下降,从而导致交流系统内部潮流大范围转移。系统运行点的这种变化可能使得发电机组间的相对功角不断拉开而出现暂态功角失稳。同时,当送受端同步联网系统发生永久性直流闭锁故障时,会导致大量潮流转移至其并列的交流输电通道上,可能超出其暂态稳定极限。3) 直流闭锁引发的电网频率失稳一般发生在送受端异步联网系统中。因为没有并列交流通道,直流闭锁后其输送功率无法转移,会导致长时间的送端功率剩余、受端功率缺额。电压稳定、功角稳定、频率稳定三者相互联系、相互影响,电力系统失稳往往是频率、电压、功角相互影响、共同作用的结果。

直流功率恢复引发的连锁故障包括连锁换相失败与暂态稳定问题。逆变站换相失败后需要从交流系统吸收大量无功功率,而目前用于无功补偿的交流滤波器或并联电容器的无功输出提供的无功功率可能不足以达到换流器的无功需求,从而造成受端电网没有足够的无功功率,很有可能引起后续换相失败或电压稳定性问题,影响直流输电系统的正常恢复,甚至可能造成受端电网出现电压崩溃问题[11]。

3. 多直流馈入电网连锁故障量化评估方法

目前,学者多注重在连锁换相失败和暂态稳定方面探究其评估方法,而直流闭锁故障涉及较少。并且直流功率恢复引发的连锁故障问题的评估方法也可包含于上述几方面。因此,本文主要从连锁换相失败与暂态失稳两方面来展开。在总结这两种连锁故障类型的影响因素的基础上,分析各种连锁故障量化评估方法及其与故障因素的关系,并对评估方法的发展作出展望。

3.1. 连锁故障影响因素

3.1.1. 连锁换相失败影响因素

当直流侧触发脉冲发生器,换流阀,线路等出现故障,或者交流侧线路、无功补偿等装置出现故障时[12],引发的单个换相失败故障由于耦合作用可能导致电气距离较近的其它逆变站出现相应问题,如:电压畸变(幅值畸变,过零点位移)、熄弧角过小、直流电流增大等[13],导致这些逆变站出现同时或相继换相失败。若不及时切除故障,连锁换相失败会影响MIDC系统的安全稳定运行。

一般认为多直流馈入电网连锁换相失败主要与多直流之间的相互耦合作用以及交流系统强度有关[14],而这二者主要受直流系统额定功率、直流系统间电气距离、交流换流母线间耦合导纳等因素[15] [16]

影响。当该母线额定功率较大、直流间电气距离较小时，该逆变侧交流系统支撑较弱、相互耦合作用较大，该线路的换相失败对其他换流母线电压影响较大；当换流母线间耦合导纳小于弱临界耦合导纳时，该母线的断路器故障一般不会导致其他母线的换相失败；当耦合导纳大于强临界耦合导纳时，该母线的短路故障一般会导致电气距离相近的其他母线的换相失败。

另外，直流侧负荷特性[15]、发生换相失败的换流变压器接法、换相失败次数等因素对连锁换相失败的发生也存在一定的影响。当该线路负荷增加，其故障影响越大；当负荷大小相同时，由于恒功率负荷在电压波动期间试图保持吸收功率不变的特性，恒功率负荷模型对连锁换相失败的影响最大。同时，随着该线路换相失败次数的增多，其他换流母线受到电压扰动的影响时间也增长。当 YNy0 与 YNd11 两种接线方式换流变所对应的阀臂均发生换相失败时，其他换流母线所承受的电压扰动更严重。

3.1.2. 电压失稳影响因素

电压崩溃是一个动态过程，分析电压失稳的机理要考虑各种动态特性的影响。多直流馈入电网受端电压稳定性的影响因素主要包括潮流无功分布、高压直流输电[17]以及负荷特性。

对暂态稳定性的分析研究中，电压失稳的根本原因是电网动态无功电源不足，即潮流的无功分布问题。潮流无功分布主要受无功补偿方式、交流系统无功支撑、发电机组无功特性三者影响[18]。1) MIDC 系统中换流器无功需求较高，通常采用并联电容器、静止无功补偿器(SVC)以及同步调相机三种无功补偿装置提供所需的部分无功功率。而不同的无功补偿装置对潮流的无功分布有不同的影响。并联电容器以及 SVC 极限运行时提供的无功功率与其母线电压的平方成正比，使得系统电压降低时其无功输出反而降低，形成恶性循环，威胁系统电压稳定。而同步调相机可以平滑调节无功功率，在极限运行时还可以维持额定电流，有助于电压稳定性的提高。另一方面，并联电容器的投切可能引起系统过电压，较大的并联电容器还会使有效短路比减小，降低交直流系统的电压稳定性[19]。2) 直流系统从交流系统故障中恢复需要一定的无功功率，足够的交流系统无功支撑是直流系统快速恢复所需无功功率的重要来源。弱交流系统易使直流系统的恢复变慢，同时可能导致系统故障时出现较高的暂态电压以及电压畸变，造成后继的换相失败，使直流恢复速度进一步放慢，甚至由于故障及故障恢复过程中系统波动太大而闭锁该直流系统[1]。较强的交流网络可以使负荷、并联电容器/电抗器的投切对电压幅值的影响较小。该影响因素主要由 MISCRA 所描述。3) 在 MIDC 系统中，发电机提供无功功率的能力对于防止电力系统电压失稳十分重要。发电机低效率的提供无功功率，或者其无功功率容量受到电枢绕组/励磁绕组的发热限制，可能导致发电机无功支撑不足，是导致电压失稳的一个重要原因。此外，发电机的无功特性还受到其电枢、励磁绕组的过载能力和电压的无功特性的影响。

高压直流输电也是电压稳定性的影响因素之一。首先，高压直流输电系统在发生严重故障时会导致潮流大量转移，此时弱电网电压的降低可能导致受端系统中感应电动机负荷无功需求的大量增加。此外，高压直流输电的基本控制方式也在影响因素的考虑范围内。直流系统控制方式一般有定电流(CC)、定功率(CP)、定电压(CV)和定关断角(CEA) [20]控制，CV/CEA 通常应用于逆变侧。对于多馈入交直流混联系统，逆变侧定电压控制的控制方式使得在交流母线电压下降时，为维持电压不变，减小关断角与触发角，从而减少无功功率消耗，最有利于电压稳定。而定关断角控制使得在交流母线电压下降时触发角增大，无功功率消耗增加，恶化电压失稳情况。

负荷特性通常由负荷模型所体现。静态负荷模型通常有恒阻抗模型、恒电流模型、恒功率模型三种，或者由三者组合而成。对于恒定阻抗模型，其 P-U 曲线与系统鼻型曲线总存在交点，表示系统一定有运行点。对于恒电流或者恒功率负荷模型，若出现故障或扰动降低系统传输能力，会导致负荷的 P-U 曲线与鼻型曲线可能不存在交点，即系统电压失稳。

3.2. 连锁故障量化评估方法

目前对于多直流馈入系统的研究是基于单直流输电系统的大量研究成果的，多直流馈入系统连锁故障的评估分析方法亦是由单故障评估方法引申而来。然而传统的单馈入直流输电系统的指标与方法并未计及多直流馈入系统中换流站与换流站、换流站与交流系统的相互影响，对于准确衡量多直流馈入电网故障风险没有意义。因此，量化评估多直流馈入电网连锁故障主要在于衡量交直流之间以及多直流之间的相互作用。GIGRE 明确提出，可采用多馈入短路比(multi-infeed short circuit ratio, MISCR)和多馈入交互作用因子(multi-infeed interaction factor, MIIF)来描述交直流以及直流与直流之间的相互耦合作用。故本小节先对多馈入短路比和多馈入作用因子这两个主要评估指标进行综述，在此基础上进一步总结其它的连锁换相失败和连锁暂态失稳的量化评估方法。

3.2.1. 连锁故障主要评估指标

1) 多馈入短路比(MISCR)

多馈入短路比是描述短路容量、影响交流系统强度的重要指标，是评估连锁换相失败、电压稳定及换相失败后直流功率恢复的重要因素。文献[21]在传统短路比的基础上，定义了新的多馈入短路比(MISCR)，并通过戴维南等值的电网简化模型推导出用节点等值阻抗计算 MISCR 的公式形式：

$$K_{MISCR} = \frac{S_{ac}}{P_{deq}} = \frac{1}{|Z_{eqi}|P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n |Z_{eqij}|P_{dj}} \quad (1)$$

若在相应直流换流母线上考虑考虑并联无功补偿容量，则可定义多馈入有效短路比(MIESCR) [19] [21]:

$$K_{MISCR} = \frac{S_{ac} - Q_c}{P_{deq}} = \frac{1/|Z_{eqi}| - 1/|Z_{ci}|}{P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n |Z_{eqij}/Z_{eqi}|P_{dj}} \quad (2)$$

由有效短路比公式可知，系统短路容量越大，无功支撑越强，且直流功率较小时，有效短路比较大，交流系统越强，同时/连锁换相失败、换相失败后系统暂态失稳的可能性越小。多馈入短路比较小时，直流侧与交流侧故障均有可能引发受端电网电压失稳。文献[22]通过理论分析与仿真实验深入研究分析了直流落点间的电气距离(互阻抗)、网络结构，包括线路阻抗、网络拓扑、电源分布等因素对短路比的影响，并给出了其变化规律(如表 1 所示)。文献[21] [22]通过仿真得出，直流子系统的多馈入短路比的最关键影响因素是该条直流子系统所对应的交流系统强度，与之耦合的电气距离的影响次之。

表 1 中， $|Z_1|$ 、 $|Z_2|$ 表示交流系统等值阻抗，受交流系统网络结构的影响。

Table 1. Change rule of Thevenin's equivalent impedance and MISCR in two-infeed system

表 1. 两馈入直流系统戴维南等值阻抗与多馈入短路比的变化规律

条件	$ Z_1 $	$ Z_2 $	电气距离 $ Z_{12} $	K_{MISCR1}
—	增大/减小	不变	不变	减小/增大
—	不变	增大/减小	不变	减小/增大
$K_{MISCR1} < K_{MISCR2}$	不变	不变	增大/减小	减小/增大
$K_{MISCR1} > K_{MISCR2}$	不变	不变	增大/减小	增大/减小

2) 多馈入交互作用因子(MIIF)

多馈入短路比仅适用于该直流系统发生当地连锁换相失败的分析评估, 而多馈入交互作用因子较适用于评估多条线路的同时换相失败问题。文献[23] [24] [25]表明 MIIF 可以很好地表征逆变站同时换相失败的风险。多条直流母线电压之间复杂的相互作用是系统同时换相失败的一个主要原因, 而 MIIF 是衡量逆变侧换流母线电压交互影响程度的度量值, 量化描述了 MIDC 输电系统中多个直流系统之间相互影响的程度[26]。文献[9]论证了减小 MIIF 能够减小同时换相失败的发生概率。为了提高评估指标的准确性, 文献[27]分别基于潮流分析以及等值电路图, 利用系统潮流降阶雅可比矩阵和节点阻抗矩阵提出了多馈入交互因子的两种解析表达式。文献[9]利用节点阻抗矩阵给出了其表达式:

$$\text{MIIF}_{j,i} = \Delta U_j / \Delta U_i = \left| \frac{Z_{ij}}{Z_{ii}} \right| \quad (3)$$

多馈入交互作用因子越大, 发生连锁换相失败的可能性越大。文献[10]分析了电气距离与受端交流系统等值阻抗对多馈入交互作用因子的影响, 以及多馈入短路比与多馈入交互作用因子的相互关系, 如表 2、表 3 所示。其指出, 多馈入交互作用因子主要被该直流系统对应交流系统强度以及与故障交流系统耦合的电气距离所影响, 而基本不被故障交流系统强度影响。

MISCR、MIIF 均是静态指标, 其计算量小, 计算过程相对简单, 多数研究证明了其判断 MIDC 系统连锁故障的准确性与有效性。但缺点在于它们的推导过程简化了许多条件, 不能适用于所有故障情况。同时其忽略了系统运行的动态过程, 影响因素难以考虑全面, 不能计及影响较小的其它因素, 且不能及时的反映出连锁故障发生时各项指标的变化情况。

3.2.2. 连锁换相失败评估方法

许多专家在 MISCR 和 MIIF 的基础上发展了多种评估方法, 主要包括换相失败免疫性指标(CFII)、暂态电压支撑强度指标(TVSI)、系统的动态过电压(TOV)等, 对评估指标进行补充。

1) 换相失败免疫性指标(CFII)

换相失败免疫性指标又称为临界多馈入交互作用因子, 文献[9]定义该指标以量化描述系统发生换相失败的容易程度。其定义如下:

$$I_{\text{CFII}} = \frac{V_{ac}^2}{Z_{\text{fault}} P_{dc}} \quad (4)$$

Table 2. Change rule of Thevenin's equivalent impedance, electrical distance and MIIF

表 2. 系统戴维南等值阻抗、电气距离与多馈入交互作用因子的变化规律

$K_{\text{MIIF}2,1}$	$ Z_1 $	$ Z_2 $	电气距离 $ Z_{12} $
增大/减小	不变	增大/减小	不变
减小/增大	不变	不变	增大/减小

Table 3. Relationship between MISCR and MIIF

表 3. 多馈入短路比与多馈入交互作用因子的关系

$K_{\text{MIIF}2,1}$	$ Z_1 , Z_2 $	电气距离 $ Z_{12} $	MISCR ₁	MISCR ₂
增大/减小	改变	不变	减小/增大	减小/增大
增大/减小	不变	改变	减小/增大	增大/减小

Z_{fault} 为换相失败临界阻抗。该公式是在临界熄弧角为 7° 的标准下由多馈入交互因子公式简化而来, 当 $\text{MIIF} > \text{CFII}$ 时默认发生连锁换相失败。逆变器抵御换相失败的能力随着该指标的增大而变强。由式(4)可看出, 换相失败免疫因子与额定线电压正相关, 与直流额定传输功率以及换相失败临界阻抗负相关。文献[28]给出了两种分析方法——灵敏度分析法和节点阻抗矩阵法来计算 CFII 中的换相失败临界阻抗, 用以作为换相失败判据标准。 CFII 是一个暂态指标, 其计算与 MIIF 相比具有明确的临界值, 可应用于实际故障判断中。不足的关键在于阻抗临界值的确定, 对于临界值的确定目前均是通过大量的仿真得到的, 没有足够的理论依据, 还需要进一步研究临界值确定的标准。

2) 暂态电压支撑强度(TVSI)

文献[29]中认为虽然多馈入交互作用因子(MIIF)可以较好的描述多直流换流母线间的相互影响程度, 但这只能应用于实验中, 无法对其进行物理解释。因此提出了暂态电压支撑强度指标(TVSI), 并验证了 TVSI 能够准确反映换流母线故障对其他直流线路的影响程度。其定义如下:

$$\text{TVSI}_{ij} = \left(1 + \frac{X_{ej}}{X_{ej}} \right)^{-1}$$

针对此公式, 文献[30]给出了易于计算的形式, 但此公式具有误差:

$$\text{TVSI}_{ij} = \frac{1}{1 + Z_{ij}/Z_{ii}} \quad (5)$$

然而该文献通过仿真计算指出, TVSI 只基于电网参数来衡量母线之间电压相互影响的程度是不准确的, 还需要考虑设备的有功和无功特性。

3) 动态过电压(TOV)

动态过电压是衡量交流系统强度的另一个重要指标, 主要受多馈入短路比影响。文献[30]基于双馈入系统对 TOV 进行了计算, 并利用不同的电压作用程度和交流系统强度分析了 MISCR 与 TOV 的关系。得出结论, 随着有效短路比的增加, 动态过电压以相同的趋势减小; 且增强整流侧换流母线电压的相互作用后, 逆变站的动态过电压也随之增加。通过其与多馈入短路比的对比, 从另一个方面验证了多馈入短路比定义的正确性。该指标在应用性能上与 MIIF 类似, 但它计及了系统的动态特性是 MIIF 所不具备的。在 MIDC 系统中, 整流侧比逆变侧承受了更高的动态过电压。

上述评估方法均是在原有 MISCR、MIIF 的基础上发展而来, 各有其侧重点, 但都没有脱离原有概念, 取得大范围的推广与应用。目前针对多直流馈入电网连锁换相失败的量化评估仍需在此基础上继续探索, 提炼出具有创新性与实用性的评估指标。

3.2.3. 暂态失稳量化评估方法

特高压直流输电对受端系统暂态稳定性的影响主要取决于两个因素, 分别为电网输送功率大小和受端交流系统强度。这两个因素影响着输电系统中的同步电机是否能够保持稳定同步、各点的电压是否能保持在额定电压附近。通常, 电网输送功率能力由最大功率曲线(Maximum Power Curve, MPC)表述, 而受端交流系统强度一般由多馈入短路比(SCR)或有效短路比(ESCR)来描述, 这个强度通常是指其维持电压稳定性的能力。另外, 电压灵敏因子法, 控制灵敏度和暂态能量函数法分别从静态和动态的角度对系统的连锁故障进行了评估。

1) 最大功率曲线法

根据短路比的划分, 系统可分为强、弱、极弱三个类别。针对强度较弱的直流系统可能出现功率不稳定的情况。最大功率曲线是指在逆变器恒熄弧角控制模式下, 直流功率关于直流电流的函数曲线, 该

方法存在最大直流功率值(Maximum Available Power, MAP)。其将 $\frac{dP_d}{dI_d} = 0$ 作为系统电压稳定的临界点，当 $\frac{dP_d}{dI_d} > 0$ 时认为系统电压稳定，当 $\frac{dP_d}{dI_d} < 0$ 时认为系统电压失稳。在 MIDC 系统中，单回直流的功率—电流曲线与单馈入系统直流的功率—电流曲线类似，因此 MPC 可以用来评估多直流馈入系统的暂态稳定性。该方法可以将各种静态负荷模型的影响考虑在内，也可以从侧面反映出所接入交流系统的强度；但总体而言，其过于简化了等值交流系统，只能作为电网前期规划的参考。

2) 电压灵敏因子法

电压灵敏因子 VSF (Voltage Sensitivity Factor) 定义为无功功率变化量与换流母线电压变化量的比值 [19]。当 VSF 为正且数值较小时，表明系统运行在电压稳定区域；当 VSF 趋于无穷大/为负，则是静态不稳定的。该参数的优点是能够直观的反映出电压与无功变化量的相对关系，缺点是其为状态参数，只能反映出静态局部稳定性，在实际情况中需要与其他参数或方法结合使用。

3) 控制灵敏度法

控制灵敏度 CSI (Control Sensitivity Index) 定义为在某特定直流控制方式下，系统两特定变量之间的关系。当系统逆变端采用恒定熄弧角控制时，CSI 为 $\frac{dy}{d\alpha}$ ，当 CSI 大于 0 说明系统不稳定；当逆变侧在恒功率控制方式下运行时，CSI 为 $\frac{dP_d}{dI_d}$ 。当逆变侧运行在恒定电压控制下、整流侧运行在定电流控制下，CSI 为 $\frac{dU_d}{d\alpha}$ 。该方法把系统稳定性和系统控制方式紧密联系，使得对不同控制方式进行稳定性分析更加容易且清晰。

4) 动态最大功率曲线法(DMPC)

与上述静态最大功率曲线法的不同之处在于，动态最大功率曲线法还计及了发电机的暂态模型、励磁参数、直流线路和控制装置动态等动态模型对最大直流传输功率的影响。文献[31] [32]将发电机的暂态模型、线路动态模型以及静止励磁系统模型纳入计算范围，得到了该系统的 DMAP。但该方法本质上仍将最大直流功率值作为系统稳定的临界点，还需继续深入探索。

5) 有效惯性常数 H_{ac}

对于频率或功角稳定通常采用相对转动惯量是用有效惯性常数 H_{ac} 来衡量[21]。有效惯性常数表示了交流系统在系统故障后保持同步的能力，因此交流系统中的发电机越多、越集中、发电机间联系越强、等效的旋转惯量就越大，则维持系统同步的时间就越长。直流系统的正常运行都必须有一个最小的短路比和一个最小的有效惯性系数。

6) 暂态能量函数法

暂态能量函数法(TEF)从系统能量的角度出发，直接估算系统的暂态稳定性。该方法可避免用于求解非线性微分方程的大量耗时，在电力系统稳定性分析和工程应用中具有重要作用。但此方法尚需解决的问题在于如何构造一个能够描述 MIDC 稳定性的暂态能量函数，以及如何确定临界稳定所对应的临界能力值。因此，TEF 在电压稳定方面仍处于研究的初步阶段。

上述方法中，前三者是针对于电压稳定性静态评估方法，后三者是描述所有暂态稳定性的动态评估方法。随着多直流馈入电网的发展，对于连锁故障的评估必然越来越重要。本文认为其发展趋势可以包含以下几个方面：首先，目前多数评估方法计算繁琐复杂，研究能够简化计算的评估方法、或者在现有方法的基础上简化计算过程，提高评估效率；其次，提炼新型动态指标，拓展动态评估方法，弥补当前动态指标的缺失；此外，完善暂态能量函数法，寻找构造相应能量函数的捷径。

4. 结论

随着电能需求量的增加,多馈入直流输电系统(MIDC)的连锁故障分析已成为一个研究热点。本文从连锁换相失败、直流闭锁、交直流系统故障后的暂态稳定问题、换相失败后直流功率的恢复四个故障阶段出发,总结概括了连锁故障的原因以及发生过程。并从连锁换相失败和系统暂态稳定两方面出发,总结了多直流之间与交直流之间的耦合强度指标,影响因素以及相应的量化评估方法,并且对这些方法做出了一定的优劣性分析。

面对新环境下电力系统的全新特征,未来的多直流馈入电网连锁故障风险评估的总体发展趋势应该包含以下几个主要方面:1)提炼出新的关于直流闭锁的量化评估指标与方法;2)目前已存在根据节点阻抗矩阵计算方法,用多馈入交互作用因子计算电压稳定边界值的仿真分析,那么如何将其余指标加入计算中是研究难点之一;3)研究各个影响因素之间是如何相互影响的;4)在系统暂态稳定方面,电压稳定的研究已发展成熟,而关于频率以及功角稳定方面仍有欠缺,还需进行深入的研究。

参考文献 (References)

- [1] 杨卫东,徐政,韩祯祥.多馈入交直流电力系统研究中的相关问题[J].电网技术,2000(8):13-17.
- [2] 邵瑶,汤涌,郭小江,等.多直流馈入华东受端电网暂态电压稳定性分析[J].电网技术,2011(12):50-55.
- [3] 黄震.多馈直流系统接入对交流电网的影响及混联系统关键问题研究[D]:[博士学位论文].成都:西南交通大学,2011.
- [4] Thio, C.V., Davies, J.B. and Kent, K.L. (1996) Commutation Failures in HVDC Transmission Systems. *IEEE Transaction on Power Delivery*, **11**, 946-957. <https://doi.org/10.1109/61.489356>
- [5] Kristmundsson, G.M. and Carroll, D.P. (1990) The Effect of AC Systems Frequency Spectrum on Commutation Failure in HVDC Inverters. *IEEE Transaction on Power Delivery*, **5**, 1121-1128. <https://doi.org/10.1109/61.53130>
- [6] 赵建伟,厉天康,严正,等.交直流电网连锁故障研究现状与展望[J].华东电力,2013(4):720-724.
- [7] 黄弘扬.交直流电力系统暂态稳定分析与控制问题研究[D]:[博士学位论文].杭州:浙江大学,2014.
- [8] 朱韬析,武诚,王超.交流系统故障对直流输电系统的影响及改进建议[J].电力系统自动化,2009(1):93-98.
- [9] 邵瑶,汤涌.采用多馈入交互作用因子判断高压直流系统换相失败的方法[J].中国电机工程学报,2012(4):108-114.
- [10] 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(3):794-799.
- [11] 王智冬.交流系统故障对特高压直流输电换相失败的影响[J].电力自动化设备,2009,29(5):25-29.
- [12] 袁阳,卫志农,雷霄,王华伟,孙国强.直流输电系统换相失败研究综述[J].电力自动化设备,2013,33(11):140-147.
- [13] 吴萍,林伟芳,孙华东,等.多馈入直流输电系统换相失败机制及特性[J].电网技术,2012,36(5):269-274.
- [14] 欧开健,任震,荆勇.直流输电系统换相失败的研究(一)——换相失败的影响因素分析[J].电力自动化设备,2003,23(5):5-8.
- [15] 杨卫东.多馈入直流输电系统的控制策略研究[D]:[博士学位论文].杭州:浙江大学,2001.
- [16] 刘羽超.多馈入直流输电换相失败机理分析与防御措施研究[D]:[硕士学位论文].北京:华北电力大学,2015.
- [17] 王艺璇.静止同步补偿器对降低多馈入直流换相失败的应用研究[D]:[硕士学位论文].济南:山东大学,2015.
- [18] 汤勇,仲悟之,孙华东,等.电力系统电压稳定机理研究[J].电网技术,2010,34(4):24-29.
- [19] 秦文丽.多直流馈入受端电网电压稳定判据与控制措施研究[D]:[硕士学位论文].北京:北京交通大学,2012.
- [20] 苏黎.高压直流输电对交流系统暂态稳定影响的研究[D]:[硕士学位论文].成都:西南交通大学,2008.
- [21] 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.
- [22] 林伟芳,汤涌,郭小江.多馈入交直流系统短路比影响因素分析[J].电网技术,2011,35(8):64-68.
- [23] 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.

- [24] Rahimi, E., Gole, A.M., Davies, J.B., Fernando, I.T. and Kent, K.L. (2006) Commutation Failure in Single- and Multi-Infeed HVDC Systems. *The 8th IEEE International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2006)*, London, 28-31 March 2006, 182-186.
- [25] Rahimi, E., Gole, A.M., Davies, J.B., Fernando, I.T. and Kent, K.L. (2011) Commutation Failure Analysis in Multi-Infeed HVDC Systems. *IEEE Transaction on Power Delivery*, **26**, 378-384.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2081692>
- [26] CIGRE Working Group B4.41 (2008) Systems with Multiple DC Infeed. CIGRE, Paris.
- [27] 肖俊, 李兴源. 多馈入和多端交直流系统相互作用因子及其影响因素分析[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 1-7.
- [28] 贺洋, 李兴源, 徐梅梅, 刘建. 多馈入直流和交流交互作用现象的研究综述[J]. 现代电力, 2009, 26(3): 7-12.
- [29] 金小明, 周保荣, 管霖, 程昕, 张尧. 多馈入直流交互影响强度的评估指标[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(15): 98-102.
- [30] 陈修宇. 多馈入直流系统电压相互作用及其影响[D]: [博士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [31] Denis, L.H.A. and Andersson, G. (1998) Impact of Dynamic Modeling on Power System of HVDC System. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **13**, 1427-1437.
- [32] Denis, L.H.A. and Andersson, G. (2006) Quasi-Static Stability of HVDC Systems Considering Dynamic Effects of Synchronous Machines and Excitation Voltage Control. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **21**, 1501-1514.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: tdet@hanspub.org