

多直流馈入受端电网交直流相互影响分析框架

郭知非¹, 郑秀波², 姚文峰¹

(1. 南方电网科学研究院, 广州 510663; 2. 广东电网规划研究中心, 广州 510080)

摘要: [目的] 现有交直流相互影响相关研究主要采用理论分析或数字仿真等方法就某些方面开展研究, 缺乏从全局角度进行全面系统性总结分析, 不利于全面分析与整体把握交直流相互影响基本过程与关键环节。[方法] 在梳理总结大量成果基础上, 建立了多直流馈入受端电网交直流相互影响问题总体分析框架; 分析了直流换相失败发生、发展、恢复和直流闭锁全过程及相关环节典型参数, 研究了交直流相互影响内涵及交直流相互影响途径, 总结了常用分析方法及工程实用判据。[结果] 提炼了交直流相互影响基本过程与核心问题, 首次以图示方式提出了多直流馈入受端电网交直流相互影响问题分析总体思路与全景框架。[结论] 为相关人士进一步深入研究交直流相互影响问题提供了参考借鉴。

关键词: 换相失败; 交直流相互影响; 分析框架; 实用判据

中图分类号: TM727; TM7

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)01-0101-06

AC/DC Interaction Analysis Framework for Load Center Power Grids with Multiple HVDC Infeeds

GUO Zhifei¹, ZHENG Xiubo², YAO Wenfeng¹

(1. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China;

2. Power Grid Planning Center of Guangdong Power Grid Company, Guangzhou 510080, China)

Abstract: [Introduction] Researches already done on AC/DC interactions in power grid mainly focuses on certain aspects by means of theoretical analysis or digital simulation. With systematic analysis absent, it is not conducive to get a comprehensive understanding of interactions between AC and DC systems. [Method] Based on a large number of studies, this paper established a analysis framework for load center power grids with multiple HVDC infeeds. Firstly, occurrence, development, recovery of HVDC commutation failures and blocking were analyzed, and typical parameters were given. Then meanings and mechanisms of AC/DC interactions were studied, commonly used analysis methods and criteria used in practice were summarized. [Result] The essence of AC/DC interactions are defined. AC/DC interaction analysis framework for load center grids with multiple HVDC infeeds is proposed schematically for the first time. [Conclusion] This paper provides useful reference for further study on AC/DC interaction related problems.

Key words: commutation failure; AC/DC interaction; analysis framework; pragmatic criteria

广东电网多回大容量直流集中馈入珠三角地区, 区内交流系统故障将可能导致直流发生换相失败, 进而转化成交流故障叠加直流故障, 从而引发交流和直流系统间的相互影响。换相失败期间, 直流有功功率大幅度减少导致逆变站近区交流系统潮流巨变; 换相失败消失后, 直流恢复功率, 将再次引发逆变站近区系统潮流重新分布。交直流间相互影响对于电网的安全稳定运行具有重大的影响。

目前, 已有众多学者对交直流相互影响相关问题开展了相关研究。如文献 [1] 和文献 [2] 对多直流馈入系统中的交直流相互作用进行了归纳和分

类, 文献 [3] 分析了换相失败后直流输电系统的恢复、交直流系统功角及电压稳定性、直流控制器间的相互作用和协调以及直流功率调制等内容, 文献 [4-8] 重点分析了直流换相失败机制其主要影响因素, 文献 [9] 针对大规模交直流电力系统仿真计算中涉及的相关问题进行了探讨, 文献 [10-12] 结合具体电网进行了交直流相互影响风险分析。

总体而言, 现有交直流相互影响相关研究主要采用理论分析或仿真方法就某些方面开展研究, 缺乏从全局角度进行系统性总结分析。本文在借鉴大量研究成果的基础上, 研究交直流相互影响内涵、相互影响途径及关键环节, 首次提出了多直流馈入受端电网交直流相互影响问题分析总体思路与全景框架。

1 直流换相失败及闭锁分析

1.1 直流换相失败发生、发展和恢复过程分析

1.1.1 换相失败影响因素分析

换相失败是常规直流逆变器最常见的故障。晶闸管阀由正向导通转换为关断的过程中,在正向导通期间内部积累的游离子必须在阀建立正向电压阻断能力之前消除。因此,直流逆变器需要有一定的反向电压-时间区域以实现去游离,否则将发生换相失败。

当直流输电逆变侧交流系统对称,且换流变压器变比为 k 时,直流逆变器熄弧角 γ 为:

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\sqrt{2} k I_d X_c}{U} + \cos\beta\right) \quad (1)$$

式中: I_d 为直流电流 (A); X_c 为等效换相电抗 (Ω); U 为逆变侧交流母线线电压有效值 (V); β 为超前触发角 ($^\circ$)。

熄弧角 γ 反映了晶闸管阀在换相后晶闸管关断到再次处于正向电压下的熄弧时间。对以上公式(1)表达式中各变量进行微分可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial \gamma}{\partial k} = \frac{-1}{\sqrt{1 - \cos^2 \gamma}} \cdot \frac{\sqrt{2} I_d X_c}{U} \\ \frac{\partial \gamma}{\partial I_d} = \frac{-1}{\sqrt{1 - \cos^2 \gamma}} \cdot \frac{\sqrt{2} k X_c}{U} \\ \frac{\partial \gamma}{\partial X_c} = \frac{-1}{\sqrt{1 - \cos^2 \gamma}} \cdot \frac{\sqrt{2} k I_d}{U} \\ \frac{\partial \gamma}{\partial U} = \frac{1}{\sqrt{1 - \cos^2 \gamma}} \cdot \frac{\sqrt{2} k I_d X_c}{U^2} \\ \frac{\partial \gamma}{\partial \beta} = \frac{\sin \beta}{\sqrt{1 - \cos^2 \gamma}} \end{cases} \quad (2)$$

由微分结果可知,晶闸管阀熄弧角相对交流电压与超前触发角的偏导数为正数,而相对直流电流、换流变比、等效换相电抗的偏导数为负数;结果表明 k 、 I_d 、 X_c 的升高,逆变侧交流系统电压 U 、超前触发角 β 的减小将导致熄弧角减小,进而导致换相失败。

若发生不对称性故障,晶闸管阀熄弧角还将与换相电压相位移 φ 有关。若交流系统某处发生 A 相接地短路故障,引发逆变侧换流母线 A 相电压降低 ΔU_A , 此时,直流逆变侧换流母线电压如图 1 所示,根据正弦定理可知:

$$\varphi = \arctan \frac{\Delta U_A}{\sqrt{3}(2 - \Delta U_A)} \quad (3)$$

此时,逆变器的熄弧角 γ 的表达式为:

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\sqrt{2} k I_d X_c}{U} + \cos\beta\right) - \varphi \quad (4)$$

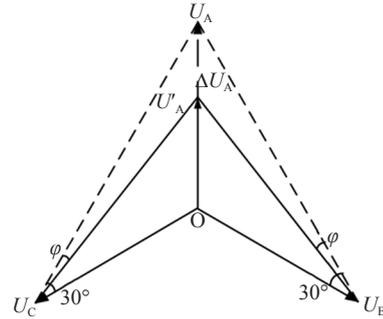


图 1 单相故障时电压过零点漂移示意图

Fig. 1 Schematic diagram of voltage zero-crossing drift in single-phase fault

直流逆变器触发电路不可靠工作造成不能准确为晶闸管分配触发脉冲,或者晶闸管反向击穿都将导致直流换相失败。

综上所述,逆变侧交流电压暂降,直流电流过大,超前触发角的减小,交流系统不对称故障导致的电压相角漂移,以及逆变器内部故障等都可能引发直流换相失败。

1.1.2 交流故障导致换相失败条件

总结交流系统故障导致直流换相失败条件的研究成果,可以得到以下初步结论:

1) 若交流系统故障导致换流母线电压跌落至额定电压的 90% 及以下,直流系统将会发生换相失败。

2) 距离直流逆变站电气距离较近(如换流母线电压跌至额定电压的 70% 及以下)的接地故障引起的逆变器换相失败将导致直流功率降为零。在故障正常清除后,直流功率将较快恢复。距离逆变站电气距离较远(如故障导致逆变侧换流母线电压跌至额定电压的 70% 及以上)的接地故障引起的换相失败不会导致直流功率将为零。

3) 在额定电压运行时,直流输送的功率越大,越小的换流母线电压跌落将导致逆变器换相失败。若逆变站换流母线三相/单相电压跌落到正常运行值 80% 以下,即使输送的直流功率接近最小允许功率值,也会使逆变器发生换相失败。

4) 当短路故障点离直流逆变站较远时(如换流母线电压在额定电压的 70% 及以上),即使故障持续时间较长也不会导致发生后续换相失败。

1.1.3 换相失败发展过程

故障清除后直流是否会发生后续换相失败、在什么条件下会发生后续换相失败、连续的换相失败是否导致直流闭锁等问题,由于涉及到直流的控制保护作用,是一个复杂的问题。梳理相关已有研究成果,可以得到以下初步结论:

1) 距离直流逆变站电气距离较远(如换流母线电压在额定电压的70%及以上)的三相和单相短路故障引起的直流换相失败,即使故障持续300 ms、500 ms,故障期间换相失败持续时间一般都在20 ms~50 ms范围内,不会引起后续换相失败。

2) 若交流系统单相短路故障导致直流换流母线单相电压跌落至额定电压的40%以下,在故障发生后100 ms至故障清除期间,直流将发生间歇性换相失败,直流功率将呈周期性振荡,直流功率将保持在直流额定功率的20%及以下。

1.1.4 换相失败后直流功率恢复特性

梳理已有研究成果,直流换相失败后直流功率恢复方面有如下初步结论:

1) 距离逆变站电气距离较近(如换流母线电压跌至额定电压的70%及以下)的短路故障引起的直流换相失败将导致直流功率降到零。如故障正常清除,直流功率将快速恢复。

2) 距离逆变站电气距离较远(如换流母线电压跌至额定电压的70%及以上)的短路故障引起的直流换相失败将不会导致直流功率降为零。即使在故障消除前,直流功率将在直流控制的快速响应下开始恢复。

3) 当交流系统短路故障点距离直流逆变站较远时(如换流母线电压保持在额定电压的70%及以上),即使短路故障持续时间长也不会导致后续换相失败的发生。且即使在故障期间,直流功率将能够恢复到一定水平。

1.2 直流闭锁分析

为保护直流输电设备,直流保护在发生长时间持续换相失败后将闭锁直流。从电网安全角度来看,最为关注的还是持续时间较长的换相失败引起直流保护动作和直流闭锁的风险问题。一旦直流闭锁,则不可能在短时间内恢复运行,必然引起扰动后电网输电能力的下降,通道潮流的大幅变化和全网稳定水平的下降。总结相关研究,可能由于换相失败而启动的保护包括:换相失败保护,阀组差动保护,桥差动保护,谐波保护(包括50 Hz保护、100 Hz保护)。

由于直流逆变站的换流器区保护中有多个主保护均对换相失败提供延时保护功能,因此长时间的换相失败必然会引起直流闭锁。具体引起直流闭锁的换相失败持续时间由以下三个保护的时延决定:

1) 阀组差动保护的2段交流低电压条件对应的时延典型值为700 ms~900 ms。

2) 桥差动保护的2段交流低电压条件对应的时延典型值为1~1.5 s。

3) 换相失败保护的时延典型值在1~2 s之间。

工程实际中应该考虑最严重的情况,即可按阀组差动保护的2段交流低电压条件对应的时延作为持续换相失败引起直流闭锁的时间判据。

2 交直流相互影响总体分析框架

视故障及系统条件不同,交直流相互影响程度及涉及的物理过程不尽相同。图2从系统安全稳定分析的角度简要描述了交直流相互影响途径及可能涉及的主要阶段与关键环节,为相关问题研究提供总体分析框架。

一般而言,交直流相互影响具体包括交流系统对直流系统的影响、直流系统对交流系统的影响,直流系统对直流系统的影响等方面内容。在相互影响途径方面,交流系统故障主要通过影响换流母线电压来影响直流;直流主要通过其与交流系统间的交换功率来影响交流系统,同时以交流系统为媒介影响其它直流换流母线电压及其功率。

典型的交直流相互影响物理演变过程可概括为:交流系统发生严重故障,导致近区(多回)直流换流母线电压骤降,直流发生换相失败,直流控制动作但未能使直流换相顺利恢复,直流保护动作闭锁直流,在故障清除后,直流重新启动恢复送电。伴随以上过程,直流与交流系统间的有功和无功功率交换发生较大幅度变化,甚至发生系统失稳。若交流系统发生一般故障或故障与直流换流站电气距离较远,交直流相互影响可能不涉及以上场景描述的全部过程。比如,交流系统发生故障,直流发生换相失败,但直流控制动作使直流换相快速恢复。

根据故障及直流运行控制参数等条件不同,直流发生换相失败或功率降为零的条件不同。对于落点广东珠三角的直流而言,直流换流母线电压跌落到正常运行电压值90%及以下将可能发生换相失败,跌到正常电压值70%及以下直流功率可能降到零。直流持续换相失败引起直流闭锁的时间一般

可按 700 ms~900 ms 考虑。

在交直流相互影响问题研究中，常见的分析方法或指标包括 MIF 指标分析、加权功率矩阵分析、多直流有效短路比分析、交流故障下直流换相失败（功率降为零）范围分析、故障时域仿真分析等。以上分析方法或指标的复杂程度，以及对交直流相互影响问题研究的全面性、深度、参考价值不尽相同。为帮助建立更加明晰的概念，以上分析方法或指标在交直流相互影响研究中所处的位置一并列入了图 2 中供参考。

3 常用分析方法与实用判据

3.1 常用分析方法

3.1.1 直流间相互作用因子

直流逆变站换流母线电压能够直接反映交直流相互影响过程。结合换流母线电压，业界提出了直流间相互作用因子（Multi-Infeed Interaction Factor）的概念，它反映的是任意两个逆变站换流母线电压之间的相互作用情况。

直流间相互作用因子一般计算方法如下：当所研究的直流输电以额定功率运行时，在逆变侧换流母线并入一定容量并联无功功率，使得换流母线电压阶跃约 1%（用 ΔU_i 表示），与此同时，监测附

近其它直流逆变侧换流母线电压的变化量（如逆变站 j 换流侧母线电压百分数变化量计为 ΔU_j ），逆变站 i 对逆变站 j 的相互作用因子则是 ΔU_j 与 ΔU_i 的比值，具体如下式所示：

$$MIF_{j,i} = \frac{\Delta U_j}{\Delta U_i} \tag{5}$$

式中： ΔU_i 是被施加电压阶变直流换流母线电压的变化量（以百分数表示，一般取为 1%）； ΔU_j 是附近其它直流逆变侧换流母线电压变化量（一般表示为百分数）。

3.1.2 多直流有效短路比

在多直流集中馈入的受端电网中，由于受端电网的短路容量被落点于该电网的所有直流输电系统逆变站共享，传统针对单回直流输电的有效短路比将不再适用，此时需要引入多直流有效短路比（Multi Infeed Effective Short Circuit Ratio）的概念。根据公式推导，多直流有效短路比是传统单回直流有效短路比概念的延伸推广。

对于有多回直流馈入电网中的某回直流逆变站 i ，其对应的多直流有效短路比将考虑附近其它直流逆变站的影响，计算多直流有效短路比的直流功率要综合考虑落点于同一交流系统中其它所有直流的共同作用，具体如图 2 所示。

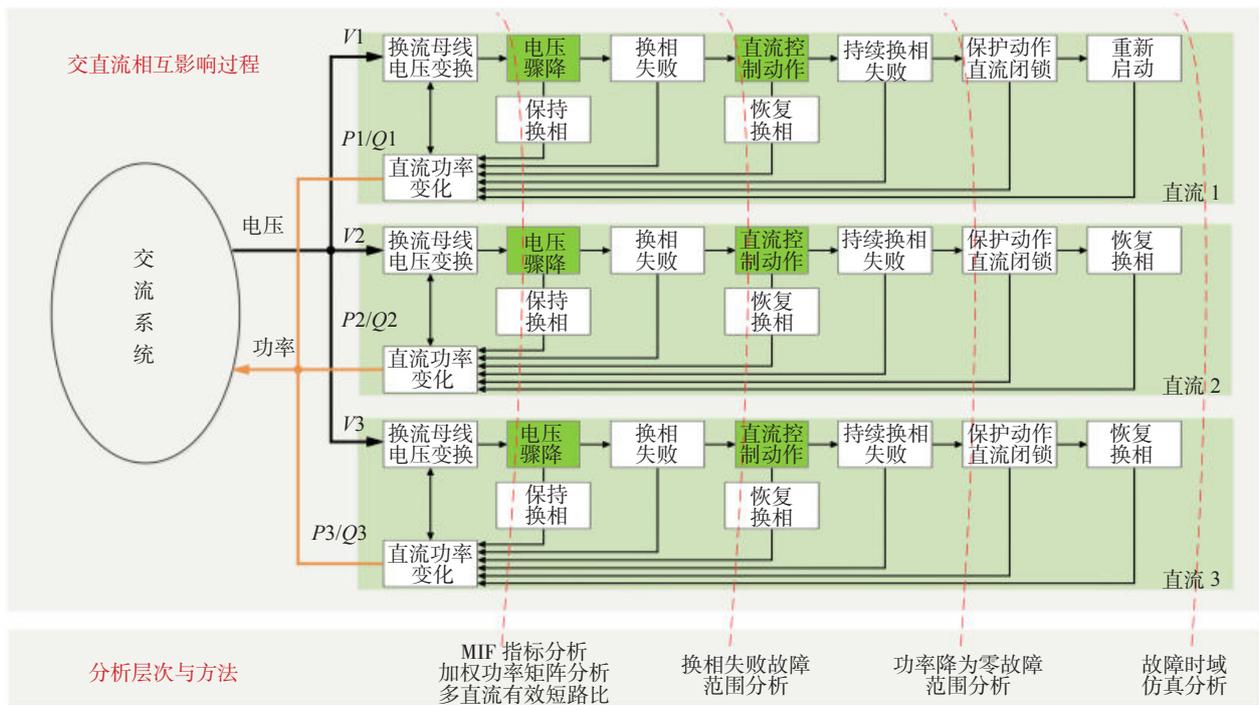


图 2 交直流相互影响过程简化示意图（以 3 回直流为例）

Fig. 2 Simplified schematic diagram of AC/DC interactions (example with 3 HVDCs are given)

$$P_{dcN,i} \rightarrow P_{dcN,i} + \sum_{j,j \neq i} (MIIF_{j,i} \times P_{dcN,j}) \quad (6)$$

综合考虑多回直流通过交流系统的相互影响后, 直流逆变站 i 的多直流有效短路比计算公式为:

$$MIESCR_i = \frac{S_{SAC,i} - Q_{CN,i}}{P_{dcN,i} + \sum_{j,j \neq i} (MIIF_{j,i} \times P_{dcN,j})} \quad (7)$$

式中: $S_{SAC,i}$ 是直流逆变站 i 换流母线交流系统三相短路容量; $Q_{CN,i}$ 是直流逆变站 i 交流母线电压为额定值、直流功率为额定值时, 直流换流站交流滤波器与并联电容器向系统提供的无功功率; $P_{dcN,i}$ 和 $P_{dcN,j}$ 则分别是直流系统 i 和 j 的额定有功功率。

3.1.3 导致多回直流同时换相失败或功率降为零故障分析

在网架方案对比或者在系统稳定特性分析中, 经常通过分析导致多回直流同时换相失败或者功率降为零的故障数来评估交直流相互影响带来的系统安全稳定风险。在以上分析中一般采用线路三相短路故障来统计多回直流同时换相失败或者功率降为零的交流故障数。

3.1.4 时域仿真方法

以上直流间相互作用因子、多直流有效短路比、交流系统故障导致直流换相失败 / 功率降为零等分析方法均只是在一定程度上评估交直流相互影响带来的潜在安全稳定风险。相对而言, 时域仿真对交直流相互影响问题分析得更为透彻深入。根据具体研究目标不同, 可采用机电暂态仿真、电磁暂态仿真、机电 - 电磁暂态混合仿真等不同时域仿真方法。

3.2 实用判据

目前, 一般采用熄弧角判别法和最小电压降落法来判别直流是否发生换相失败。熄弧角判别法通过比较引起换相失败的最小熄弧角和换流器实际熄弧角间的差别来判断直流是否发生换相失败。最小电压降落法则是通过比较发生换相失败最小电压和换流母线实际最低电压来判别直流是否发生了换相失败。

目前, 在机电仿真分析中通常采用最小电压降落法进行直流换相失败甄别。具体考虑为: 若交流系统故障后瞬间直流逆变站换流母线电压跌落到额定电压的 90% 及以下, 一般即可认为该直流已经发生换相失败。该判据简单实用且偏保守。

4 结论

本文梳理了直流换相失败发生、发展、恢复和直

流闭锁等过程及相关典型参数, 总结了交直流相互影响的物理内涵及具体相互影响途径, 总结了交直流相互影响常用分析方法, 提纲挈领地建立了多直流馈入受端电网交直流相互影响问题总体分析框架。

多直流馈入受端电网中交直流相互影响物理过程复杂, 涉及不同发展阶段和若干关键环节。若没有清晰思路, 完整框架, 将难以抓住重点, 容易以偏概全。有别于理论研究, 公式推导、仿真计算等传统思路方法, 本文从系统安全稳定分析角度出发, 首次以图形化方式阐述了多直流馈入受端电网交直流相互影响全景物理过程及关键环节, 明确了不同环节间的逻辑关系, 指出了常用方法和指标在分析交直流相互影响问题中的层次差别和相互关系。为进一步深化对交直流相互影响问题的认识提供了总体分析框架。

参考文献:

- [1] 徐政. 含多个直流换流站的电力系统中交直流相互作用特性综述 [J]. 电网技术, 1998, 22 (2): 16-19.
XU Z. AC/DC and DC/DC interactions of multiple HVDC links terminating in the same AC system [J]. Power System Technology, 1998, 22 (2): 16-19.
- [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 Y, TANG Y. Research survey on multi-infeed AC/DC hybrid power systems [J]. Power System Technology, 2009, 33 (17): 24-30.
- [3] 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, 24 (8): 13-17.
YANG W D, XU Z, HAN Z X. Special issues and suggestions on multi-infeed AC/DC power systems [J]. Power System Technology, 2000, 24 (8): 13-17.
- [4] 郝跃东, 倪汝冰. HVDC 换相失败影响因素分析 [J]. 高电压技术, 2006, 32 (9): 38-41.
HAO Y D, NI R B. Analysis on influence factors of commutation failure in HVDC [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32 (9): 38-41.
- [5] 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.
WU P, LIN W F, SUN H D, et al. Research and electromechanical transient simulation on mechanism of commutation failure in multi-infeed HVDC power transmission system [J]. Power System Technology, 2012, 36 (5): 269-274.
- [6] 张妍, 游雨琛, 周雷. 多馈入交直流混合系统的相互影响研究综述 [J]. 宁夏电力, 2017 (1): 22-28.
ZHANG Y, YOU Y C, ZHOU L. Research survey for interactions between multi-infeed AC and DC hybrid power system [J]. Ningxia Power, 2017 (1): 22-28.
- [7] 索明贵. 多直流落点系统中高压直流换相失败问题的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.

- [8] 席亮. 多直流落点系统换相失败及恢复特性的仿真研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [9] 徐政, 蔡晔, 刘国平. 大规模交直流电力系统仿真计算的相关问题 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (15): 4-8.
XU Z, CAI Y, LIU G P. Some problems in the simulation of large-scale AC/DC power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (15): 4-8.
- [10] 毛晓明, 吴小辰. 南方交直流并联电网运行问题分析 [J]. 电网技术, 2004, 28 (2): 6-9.
MAO X M, WU X C. Analysis on operational problems in South China AC/DC hybrid power grid [J]. Power System Technology, 2004, 28 (2): 6-9.
- [11] 邵瑶, 汤涌, 郭小江, 等. 2015 年特高压规划电网华北和华东地区多馈入直流输电系统的换相失败分析 [J]. 电网技术, 2011, 35 (10): 9-15.
SHAO Y, TANG Y, GUO X J, et al. Analysis on commutation failures in multi-infeed HVDC transmission systems in North China and East China power grids planned for UHV power grids in 2015 [J]. Power System Technology, 2011, 35 (10): 9-15.
- [12] 洪潮. 直流输电系统换相失败和功率恢复特性的工程实例仿真分析 [J]. 南方电网技术, 2011, 5 (1): 1-7.
HONG C. Simulation analysis on the commutation failure and power recovery characteristic of an actual DC transmission system [J]. Southern Power System Technology, 2011, 5 (1): 1-7.

作者简介:



郭知非

郑秀波

1984-, 男, 山东冠县人, 广东电网规划研究中心专责, 华中科技大学电气工程硕士研究生, 主要从事电力系统规划研究工作 (e-mail) zhengxiubo@gd.csg.cn。

姚文峰

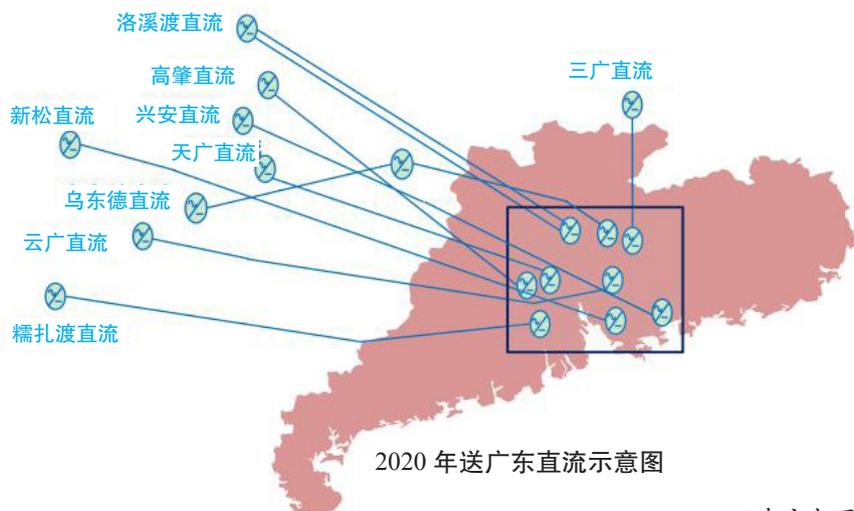
1980-, 男, 湖南娄底人, 南方电网科学研究院室主任, 湖南大学电气工程硕士研究生, 主要从事电力系统稳定分析与控制、电网规划设计 (e-mail) yaowf@csg.cn。

(责任编辑 郑文棠)

典型多直流馈入受端电网广东电网概况

广东电网是全国规模最大的省级电网, 也是世界上最复杂的多直流馈入受端电网。2019 年广东全社会最高负荷约 124 GW, 用电量约 669.200 TWh; 接受西电最大容量 40.080 GW, 约占全社会用电负荷的 36%。截至 2019 年底, 广东电源装机容量约 134 GW。广东省共有 500 kV 变电站 59 座, 500 kV 变电容量 138.874 GVA。经过多年发展, 广东已经围绕珠三角建成较为完善的内外双环网。

截至目前, 广东电网已经有 9 回大容量直流约 32.200 GW 电力集中馈入珠三角地区。参考规划, 2035 年馈入广东珠三角地区的直流共 10 回, 总容量为 37.200 MW。具体包括天广直流、高肇直流、三广直流、兴安直流、云广直流、糯扎渡直流、溪洛渡直流 (两回)、新松直流、乌东德直流。目前, 广东电网主要面临短路电流控制困难, 交直流相互影响问题突出, 以及潮流控制困难、发生连锁故障的风险高等问题。



2020 年送广东直流示意图

(南方电网科学研究院 郭知非)