

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.10.006

特高压交直流背景下电网外送电能力分析

许云飞¹, 金国锋¹, 刘 阳², 张建华², 蒙 园²,
龙日尚², 胡 浩², 谭 涛²

(1. 国网内蒙古东部电力有限公司经济技术研究院, 呼和浩特 010010;
2. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 从多馈入直流系统稳定性分析理论出发, 延伸得出多送出特高压交直流背景下电网外送电能力分析方法。其中, 由多馈入短路比指标延伸得出多送出短路比指标, 通过设定多送出短路比指标求得电网此时的外送电能力, 再利用BPA仿真平台进行稳定性分析, 根据分析结果对多送出短路比指标进行不断修正, 调整外送电容量直至多送出短路比指标达到设定值, 最终得出电网的外送电能力, 为建设特高压直流线路提供意见和建议。

关键词: 直流输电; 多送出短路比; 外送电能力; 稳定性分析

Outward Transmission Capacity Analysis Under the Background of UHV AC/DC Power Grid

XU Yunfei¹, JIN Guofeng¹, LIU Yang², ZHANG Jianhua², MENG Yuan²,
LONG Rishang², HU Hao², TAN Tao²

(1. Inner Mongolia Eastern Electric Power Co., Ltd., Economic and Technical Research Institute, Huhhot 010010, China;
2. State Key Laboratory of New Energy Power System, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Based on the stability analysis theory of multi-infeed high voltage direct current (HVDC) system, the transmission capacity analysis method of multi-send ultra high voltage (UHV) AC/DC power grid is studied in this paper. By extending the multi-infeed short circuit ratio index, we can get the multi-send short circuit ratio index (MSSCR). The present outward transmission capacity of the power grid is obtained by setting the MSSCR, and then the stability of the system is analyzed by using BPA simulation platform. The MSSCR is revised according to the analysis results, and adjust the outward transmission capacity until MSSCR reaches the set value, which is the final outward transmission capacity of the grid, and provides opinions and suggestions for the construction of UHV DC lines.

Key words: DC power transmission; multi-send short circuit ratio; outward transmission capacity; stability analysis

0 引言

中国地域广阔、能源丰富, 但是经济发达的负荷中心与能源丰富的电源中心分布并不均衡。由于能源与用电在空间分布上的矛盾, 且随着经济发展和电力需求的增加, 未来将在全国范围内形成大规模电力流格局^[1-4]。随着国家“西电东送”、“南北互供”电力能源政策的制定与实施, 全国电力资源的优化配置力度将进一步加大, 未来将形成大范围各

区域电网之间的交直流联接^[5-9]。

随着直流输电线路的不断建设, 电网的结构也就越发复杂, 从简单的单直流连接两个非同步电网到大规模的交直流混联, 从简单的单直流送出到大规模的多直流送出, 这些改变缓解了资源与负荷的不均匀分布带来的矛盾问题, 但是随着电网结构的复杂化, 电网的安全稳定性方面的问题也随之增多。

但是目前对于交直流混合系统的研究更多的是关注于多馈入地的安全稳定性^[10-13], 而忽略了送

收稿日期: 2018-03-03; 修回日期: 2018-05-30

基金项目: 蒙东电网项目支持(52660615000G)。

Project Supported by East Inner Mongolia Power Grid(52660615000G).

出地区的相关情况。文[14]利用量化评估指标和小干扰稳定性分析方法对雅安—荆门 100 kV 特高压交流投运进行了分析,得出了该条线路对送端系统3条直流线路的影响,但所使用的直流系统量化评估指标都是对馈入交互作用因子等多馈入指标,并未提出送出端指标。文[15]对特高压直流系统与风电的协调控制运行及设备操作特性进行了研究,提出了跟随风功率波动进行直流功率协调控制的有功控制策略,提高了系统的故障恢复能力,但并未对其外送电能力进行具体分析。但是,其实送端系统往往是能源相对集中的地区,各送出线路(包括直流送出和交流送出)之间的耦合是比较紧密的^[16],若送端系统的网架结构比较薄弱则在送端系统之中交直流之间以及各直流线路之间的相互影响往往不可忽略。

文中分析了国内外特高压交直流混联电网的发展现状,对多馈入直流环境下电网的外受电能力分析方法进行延伸和改变,改进得出多送出短路比指标和交流电网外送电能力分析方法,并通过实际算例证明该方法的有效性。

1 特高压交直流混联电网外送电形式

交直流混联系统中通常是先有交流输电线路,为增强送端系统的外送电能力而加入直流输电线路^[17]。根据结构的不同,送端电力系统的送出形式可以分3种:电厂直接外送、网内单点送出和网内多点送出,见图1。

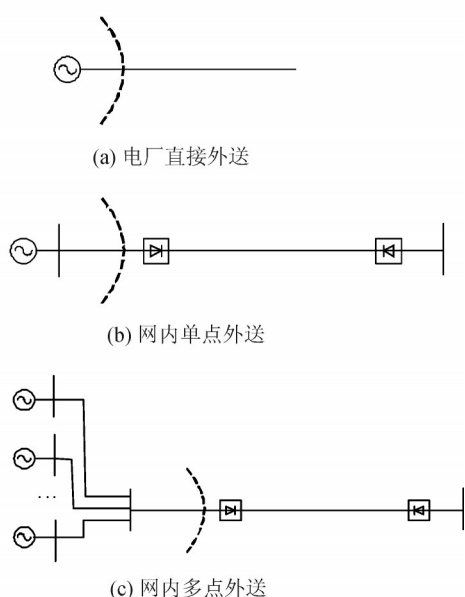


图1 送端电力系统的送出形式

Fig. 1 The sending form of the sending-end system

其中,电厂直接外送适用于大功率电厂,电能从电厂发出后直接通过直流输电线路传递到负荷中心为负荷供电,这种送出方式也比较容易进行分析,因为电厂直接外送的情况发生故障时送出端较为孤立,故障造成的后果不会太严重^[18];网内单点外送与电厂直接外送类似,但是存在交流电网对直流输电的影响问题,电网中的故障可能导致整流母线电压波动,波动过大时可能导致换相失败引起直流输电线路无法外送电能;网内多点外送是指由多个网内多点形成的直流输电线路,适用于多风电场互联或多种新能源发电互联的电网,能够有效提高供电的灵活性和多元化,这种外送情况下交直流之间的相互影响较大,交流系统故障可能导致直流系统因充电过电压而闭锁,而直流侧故障导致大量电能不能外送也可能使得交流侧产生较大波动^[19-20]。

2 外送电能力分析指标

2.1 直流相互影响因子 DMIF

电厂直接外送和网内单点外送两种方式中,直流输电线路只有一条,因此没有直流相互影响因子;而在网内多点外送方式中,可能存在多条直流线路,因此需要研究多送出直流系统中各直流线路之间相互作用的强弱。 $DMIF$ 可定义为,在直流线路受到扰动时,直流线路 i 的换流母线电压下降1%时,直流线路 j 的换流母线电压的下降率^[21],其公式为

$$DMIF_{ji} = \frac{\Delta U_j}{\Delta U_i} \quad (1)$$

式(1)中: ΔU_i 为直流线路 i 的换流母线上投切一个并联无功功率支路后,使其换流母线电压下降1%; ΔU_j 为直流线路 j 的换流母线电压变化量。

2.2 多送出短路比 MSSCR

在网内单点外送和网内多点外送方式中,交流和直流之间存在相互影响的作用,这种相互影响作用取决于交流系统与所连接直流系统容量的相对大小。为评估多送出直流系统中交直流间的相互影响作用,对传统短路比及多馈入短路比进行延伸^[22-24],提出多送出短路比,其计算公式为

$$MSSCR_i = \frac{S_{aci}}{P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^K DMIF_{ji} \cdot P_{dj}} = \frac{S_{aci}}{P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^K \frac{\Delta U_j}{\Delta U_i} \cdot P_{dj}} \quad (2)$$

式(2)中: $MSSCR_i$ 为第 i 回直流所对应的多送出

短路比; 为第*i*回直流线路整流侧母线的短路容量; P_{di} 、 P_{dj} 分别为第*i*、*j*回直流线路所传输的有功功率; $DMIF_{ij}$ 为直流线路相互影响因子。

根据以往对多馈入短路比的研究可以延伸得出^[25-26],多送出短路比越大,系统强度越大。

3 外送电力分析方法

结合文2节所述指标,对电网外送电力进行分析,具体思路为:首先,搭建包括电网联络线路在内的系统模型,作为外送电的能力分析的基础;然后,根据电网对系统强弱的要求不同,设定多送出短路比的数值;假设外送电方式以及外送电功率值,求解多送出短路比并判断求解结果是否满足要求,若满足,则此时的外送电值即为电网的外送电能力,否则,需要不断地调整外送电量并重新计算多送出短路比,直至能够满足设定值。在满足初始设定的多送出短路比值之后,可以根据故障选取原则选择相应的故障进行稳定性分析,若电网不能保持稳定则可以重新设定短路比值,直至电网稳定为止。

电网外送电力分析方法的流程图见图2。

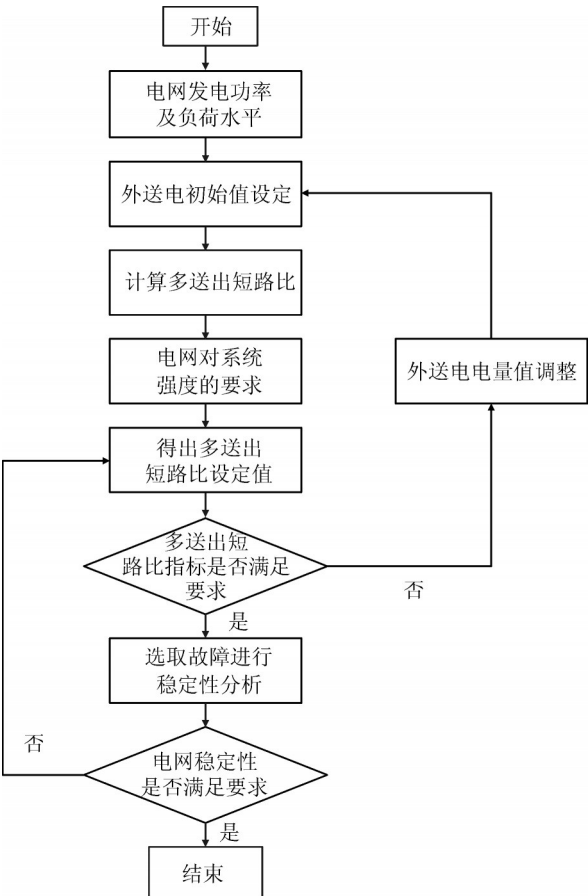


图2 外送电力分析流程图

Fig. 2 The flow chart of the outward transmission capacity analysis method

4 算例

以某电网为例进行分析,该地区拥有大量的自然资源,包括煤、石油和天然气等矿产能源,因此其发电量很大,但其本地负荷却远未不及发电量大,因此该地区会通过特高压线路向外输送电能。其中,已经建成了某条输电线路,其容量为800万kW,另外规划建设另一条特高压直流输电工程,文中对其输送容量进行规划。

根据该地区对电网强弱的要求,将多送出短路比指标暂定为2.5。在这种外送电方式下进行多送出短路比计算。此时计算所得结果见表1。

表1 该电网外送电力初次分析结果

Table 1 The primary analysis results of the outward transmission capacity of the power grid

指标	输电线路1	输电线路2
MSSCR	2.50	4.54

此时,外送电容量约为900万kW。对其进行稳定性分析,经分析可得,在*N*-1故障下,1 000 kV、500 kV线路以及各变压器均不过载,满足*N*-1静态安全标准,在直流单极闭锁故障中,也无需切机。由于输电线路1,输电线路2两回直流电源位置较近,如果出现强风、地震等严重灾害,可能导致两回直流停运,因此对该地区火电外送特高压直流同时失去的情况下进行稳定性分析,得出结果见表2。

表2 初次计算中特高压直流同时失去情况下电压最低值

Table 2 The voltage minimum value while losing UHVDC at the same time in the primary calculation

序号	母线名称	电压最低值/p.u.
1	母线1	0.748 94
2	母线2	0.805 01

根据表2可知,将直流输电线路的外送电容量定为900万kW,对该地区电压影响较大,使其电压低于电力系统要求,导致电压失稳。因此表明送端系统电网强度过低,因此,重新为多送出短路比赋值,再次进行计算。

为提高电网强度,将多送出短路比指标改为3.0,在这种外送电方式下重新进行多送出短路比计算。此时计算所得结果见表3、4。

表3 该电网外送电力二次分析结果

Table 3 The second analysis results of the outward transmission capacity of the power grid

指标	输电线路1	输电线路2
MSSCR	3.00	5.09

表4 二次计算中特高压直流同时失去情况下电压最低值
Table 4 The voltage minimum value while losing UHVDC at the same time in the second calculation

序号	母线名称	电压最低值/p.u.
1	母线1	0.765 61
2	母线2	0.816 41

此时,外送电容量约为850万kW。对其进行稳定性分析,可知满足 $N-1$ 静态安全标准,在直流闭锁故障中,也无需切机。根据表4可知,将直流输电线路2的外送电容量定为850万kW,虽然仍未达到电力系统的要求,但是系统的电压稳定性已有所提高。

重复以上过程不断改变多送出短路比的值,最终可以得到满足系统稳定要求的合适的外送电容量,该容量就是该地区电网的外送电能力。

5 结论

文中由多馈入直流系统稳定性分析理论出发,延伸得出多送出特高压交直流背景下电网外送电能力分析方法。结合稳定性分析结果对多送出短路比进行不断修正,调整外送电容量直至多送出短路比指标达到设定值。在分析过程中可以得出以下结论:

1)根据多馈入短路比指标延伸出多送出短路比指标,用于评估送出端电网交直流和各直流线路之间的相互影响。

2)随着直流外送功率的增加,当直流线路发生闭锁故障时,对电网稳定性的影响就越大,因此根据电网稳定性修正多送出短路比指标,进而改变线路送出功率,则最后可据此得出电网外送电能力。

参考文献:

- [1] 李 静,况明生. 中国能源特点和可持续发展战略[J]. 国土资源科技管理,2009,26(4):60-64.
LI Jing, KUANG Mingsheng. Energy characteristics and sustainable development strategy of China[J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 2009, 26(4):60-64.
- [2] 马 莉,范孟华,郭 磊,等. 国外电力市场最新发展动向及其启示[J]. 电力系统自动化,2014,38(13):1-9.
MA Li, FAN Menghua, GUO Lei, et al. Latest development trends of international electricity markets and their enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13):1-9.
- [3] 周孝信,鲁宗相,刘应梅,等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):4999-5008.

ZHOU Xiaoxin, LOU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development, planning and implementation of the project of power transmission from west china to east China[J]. Power System Technology, 2003, 27(5):1-6.

- [4] 程春田,励 刚,程 雄,等. 大规模特高压直流水电消纳问题及应用实践[J]. 中国电机工程学报,2015,35(3):549-560.
CHENG Chuntian, LI Gang, CHENG Xiong, et al. Large-scale ultra high voltage direct current hydropower absorption and its experiences[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3):549-560.
- [5] 周小谦. 我国“西电东送”的发展历史、规划和实施[J]. 电网技术,2003,27(5):1-6.
ZHOU Xiaoqian. Development, planning and implementation of the project of power transmission from west China to east China[J]. Power System Technology, 2003, 27(5):1-6.
- [6] 迟永宁,姚良忠,庄 俊,等. 新能源接入直流电网实证及实验方案研究[J]. 智能电网,2016,4(8):811-823.
CHI Yongning, YAO Liangzhong, ZHUANG Jun, et al. Research on renewables-based DC grid demonstration system and experimental strategy[J]. Smart Grid, 2016, 4(8):811-823.
- [7] 陈博怡,李兴源,胡永银,等. 混和直流输电控制策略研究[J]. 高压电器,2016,52(1):118-123.
CHEN Boyi, LI Xingyuan, HU Yongyin, et al. Research of control strategies for hybrid HVDC[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(1):118-123.
- [8] ZHANG J H, WU Z P, HU T, et al. Research on coordinated control technology for AC/DC hybrid system in China[C]//2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition. [S.l.]: IEEE, 2014:1-5.
- [9] ZHOU J, GUO J B, GUO Q, et al. Security and stability study of planning UHVAV/DC hybrid transmission system[C]//4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). [S.l.]:[s.n.], 2011:1026-1030.
- [10] 李兆伟,翟海保,刘福锁,等. 对馈入交直流混联受端电网直流接入能力研究评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016,44(8):142-148.
LI ZhaoWei, ZHAI Haibao, LIU Fusuo, et al. DC access capability study for multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8):142-148.
- [11] 汤 奕,陈 斌,皮景创,等. 特高压直流分层接入方式下手段交流系统接纳能力分析[J]. 中国电机工程学报, 2016,36(7):1790-1800.
TANG Yi, CHEN Bin, PI Jingchuang, et al. Analysis on absorbing ability of receiving AC system for UHVDC hierarchical connection to AV grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7):1790-1800.

- [12] 杨 堤, 程浩忠, 姚良忠, 等. 多端直流输电接入下的交直流混联系统电压稳定性研究综述[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2201-2209.
- YANG Di, CHENG Haozhong, YAO Liangzhong, et al. Research review on AC/DC hybrid system with multi-terminal HVDV[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2201-2209.
- [13] WANG P F, ZHANG Y M, CHEN H, et al. Analysis on the interaction of AC/DC system based on multi-infeed q effective short circuit ratio[C]//2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. [S.l.]:[s.n.], 2012:1-4.
- [14] 陈 虎, 张英敏, 贺 洋, 等. 特高压交流对四川电网多送出直流输电系统影响评估[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 136-141.
- CHEN Hu, ZHANG Yingmin, HE Yang, et al. Impact assessment of UHVAC on multi-send HVDC system of Sichuan power grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 136-141.
- [15] 朱艺颖, 董 鹏, 谢国平, 等. 适应大规模风电外送的特高压直流协调控制实施仿真研究[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1814-1819.
- ZHU Yiyang, DONG Peng, XIE Guoping, et al. Real-time simulation of UHVDC cooperative control suitable to large-scale wind farms[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1814-1819.
- [16] TU J Z, ZHANG J, BU G Q, et al. Analysis of the sending-side system instability caused by multiple HVDC commutation failure[J]. Csee Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(4): 37-44.
- [17] 陈 凯, 段翔颖, 郭小江. 特高压交直流混联电网稳定控制分析[J]. 电力建设, 2016, 37(1): 64-69.
- CHEN Kai, DUAN Xiangying, GUO Xiaojiang, et al. Stability control analysis of UHV AC/DC hybrid power grid[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(1): 64-69.
- [18] 郝正航, 肖忠云, 张宏俊, 等. 风电场孤岛直流外送系统的稳定控制[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2193-2198.
- HAO Zhenghang, XIAO Zhongyun, ZHANG Hongjun, et al. Stability control of HVDC transmission system for islanded wind farm[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2193-2198.
- [19] 伍双喜, 李 力, 张 轩, 等. 南澳多端柔性直流输电工程交直流相互影响分析[J]. 广东电力, 2015, 28(4): 26-30.
- WU Shuangxi, LI Li, ZHANG Xuan, et al. Analysis on AC/DC interaction of Nan'ao multi-terminal flexible VSC-HVDC transmission engineering[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(4): 26-30.
- [20] 盛万兴, 李 蕊, 李 跃, 等. 直流配电电压等级序列与典型网络架构初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3391-3403.
- SHENG Wanxing, LI Rui, LI Yue, et al. A Preliminary study on voltage level sequence and typical network architecture of direct current distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3391-3403.
- [21] 郭小江, 郭剑波, 王成山. 考虑直流输电系统外特性影响的多直流馈入短路比实用计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 2143-2151.
- GUO Xiaojiang, GUO Jianbo, WANG Chengshan. Practical calculation method for multi-infeed short circuit ratio influenced by characteristics of external characteristics of DC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 2143-2151.
- [22] 辛焕海, 章 枫, 于 洋, 等. 多馈入直流系统广义短路比: 定义与理论分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 633-647.
- XIN Huanhai, ZHANG Feng, YU Yang, et al. Generalized short circuit ratio for multi-infeed DC systems: Definition and theoretical analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 633-647.
- [23] 郭春义, 倪晓军, 赵成勇. 混合多馈入直流输电系统相互作用关系的定量评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1772-1780.
- GUO Chunyi, NI Xiaojun, ZHAO Chengyong. A quantitative evaluation method on interaction analysis of hybrid multi-infeed HVDC system[J]. Proceedings of CSEE, 2016, 36(7): 1772-1780.
- [24] 冯 明, 李兴源, 洪 潮, 等. 基于多馈入功率恢复因子的南方电网多回直流分层协调控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2822-2829.
- FENG Ming, LI Xingyuan, HONG Chao, et al. Study of layered coordinated control strategy of CSG's HVDC systems based on multi-infeed power recovery factor[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2822-2829.
- [25] 程 昕. 短路比指标在多直流馈入电网中的应用分析[J]. 电气技术, 2016, 4: 42-48.
- CHEN Xin. Analysis of short circuit ratio index application in multi-infeed-HVDC grid[J]. Electrical Engineering, 2016, 4: 42-48.
- [26] 徐 蔚, 程斌杰, 林 勇, 等. 基于多馈入交互作用因子的直流分区原则和方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 108-116.
- XU Wei, CHENG Binjie, LIN Yong, et al. DC-segmentation planning based on multi-infeed interaction factor[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 108-116.

许云飞(1981—),男,硕士,高级工程师,主要从事电网规划工作。