

多回直流输电系统稳定性研究

陈 荔¹, 刘会金¹, 陈格桓²

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072;

2. 广东省电力设计研究院, 广东 广州 510600)

摘要: 采用 BPA 数字仿真法, 分别研究了三峡—华东多回直流输电系统在直流线路故障(单、双极闭锁)时的暂态稳定性, 以及直流功率提升和切机措施对保持三峡电网暂态稳定性的作用。计算结果表明, 2 回直流输电线路各自单极闭锁以及葛上直流输电线路双极闭锁时, 三峡电网都能保持稳定; 三常直流输电线路双极闭锁时, 三峡电网必须同时进行直流功率提升和切机才能保持稳定。

关键词: 三峡电网; 直流输电; 功率提升; 切机

中图分类号: TM 712; TM 744

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)08-0047-03

本文选取由三峡电网向华东电网送电的 2 条直流输电线路作为研究对象, 通过对直流故障稳定计算结果的分析, 研究对三峡电网安全稳定运行的影响, 并尝试提出解决方案, 为保证三峡电网的安全稳定运行和实现大负荷的西电东送提供技术基础。

1 稳定计算分析所采用的条件^{[1~4]①}

1.1 计算对象

本次计算主要研究多回长距离直流线路集中向华东电网送电发生直流故障时对送端电网——三峡电网安全性的影响。三峡至常州(简称三常)±500 kV 直流输电线路全长 890 km, 额定输电容量为 3 000 MW, 于 2003 年单极投运; 葛洲坝至上海(简称葛上)±500 kV 直流线路全长 1 045.7 km, 额定输电容量为 1 200 MW, 于 1990 年投运。2005 年三常直流

线路将双极投运, 而三峡电站左岸 13 台机组也将全部投运, 联网将初具规模, 因此本次计算选取研究水平年为 2005 年。

1.2 运行方式

重点研究稳定问题比较突出的夏大基本运行方式, 同时也考虑了检修运行方式和特殊运行方式。

1.3 计算工具、计算模型及计算条件

计算使用国电公司中南电力设计院提供的三峡、华东联网工程系统计算数据, 使用由美国引进、中国电力科学院开发改进的《BPA 电力系统分析程序》。

发电机模型采用考虑次暂态过程的 E_q' 和 E_d'' 变化模型, 考虑调速工程和励磁系统的作用; 负荷模型中, 华东电网采用恒定功率、恒定电流和恒定阻抗组成的综合模型, 三峡电网采用感应电动机和恒定阻抗组成的综合模型, 均计及负荷频率因子的影响。

① 三峡电力系统安全稳定控制装置初步设计, 国家电力公司中南电力设计院, 2002.

收稿日期: 2005-04-06

Application of genetic algorithm based neural network in UHF PD pattern recognition of generator stator

TIAN Zhi-guang¹, ZHANG Hui-fen², LANG Li-guo¹

(1. Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. Ji'nan University, Ji'nan 250022, China)

Abstract: The structural features of on-line high-frequency monitoring system for generator stator PD (Partial Discharge) is introduced, and the PD characteristics are picked up. By using BP-NN (Neural Network), AGA (Adaptive Genetic Algorithm)-NN and AGA-BP-NN, three types of ultra-high-frequency PD pattern appeared in generator stator are recognized: interior discharge, end discharge and slot space discharge. An AGA-BP hybrid algorithm based on AGA and BP algorithm is presented to train NN. Tests show that, it is not as sensitive to initial weights and easy in premature convergence as BP-NN algorithm, and enhances the convergence speed, stability and solution quality of AGA-NN algorithm.

This project is supported by Shandong Province Natural Science Fund(Y2004F15).

Key words: generator; ultra-high-frequency PD; pattern recognition; AGA-NN algorithm; AGA-BP-NN algorithm

通过计算校核系统的安全稳定性,要求在直流输电系统单极、双极故障闭锁时,送端电网仍能保持稳定。系统保持稳定的 3 个判据^[5]描述如下。

- a. 功角稳定:故障切除后,同步系统中任意 2 台机组相对功率角 $\leq 180^\circ$,并呈减幅振荡。
- b. 电压稳定:故障后系统能够保持电压稳定性,主要枢纽变电站母线电压恢复到 ≥ 0.8 p.u.,持续 < 0.75 p.u.的时间 ≤ 1 s。
- c. 频率稳定:故障查明后,电力系统的频率恢复到允许范围以内,即在安全稳定控制系统动作以后,不发生系统频率崩溃,能够恢复到正常范围及不影响系统的正常运行。根据华东电网和三峡电网 (50 ± 0.2) Hz 的频率考核指标作为判断频率是否失稳的判据。

故障切除时间考虑直流线路故障下,单极、双极闭锁,故障后 0.06 s 闭锁故障级;切机、解列动作时间一般为 0.3~0.4 s;遥切时还要考虑通信延时,一段线按 0.02 s 计。

2 直流系统故障时稳定性分析

与向南方电网送电方式不同的是,三峡电网与华东电网互联只采用直流背靠背输电系统互联。虽然其复杂程度、技术难度要低于三峡电网与南方电网之间的交直流混合输电系统,但是三常、葛上 2 条直流线路是三峡电网向华东电网送电的重要通道,如发生直流系统故障,势必影响两端电网的安全稳定运行,而且对送端三峡电网稳定性的影响更大。

本次计算依次研究了直流输电线路发生单极、双极故障闭锁,另一条直流线路正常运行时对三峡电网稳定性的影响,结果见表 1。

表1 2005 年夏大方式下直流系统故障对三峡电网稳定性的影响

Tab.1 Impact of HVDC faults on the stability of Three Gorges power system under 2005 summer peak operation mode

直流线路	直流功率是否提升	单极闭锁		双极闭锁	
		稳定性	$\Delta f_{\max}/\text{Hz}$	稳定性	$\Delta f_{\max}/\text{Hz}$
三常线	否	稳定	0.15	失稳	0.25
	是	稳定	0.12	失稳	0.21
葛上线	否	稳定	0.08	稳定	0.12
	是	稳定	0.05	稳定	0.10

注: $\Delta f_{\max}$ 为最大频率偏差;后同。

从表 1 中可知,当这 2 条直流输电线路任一条发生单极闭锁以及在葛上直流线路双极闭锁时,三峡电网均能保持稳定。但是在三常直流线路双极闭锁时,其最大频率偏差超过了华东电网和三峡电网 (50 ± 0.2) Hz 的频率考核指标,系统频率失去稳定,会形成系统有功功率缺额增大与频率偏差进一步增大的恶性循环,如不及时处理,最终将造成系统崩溃。

3 直流系统稳定控制措施探讨^[6-8]

从事故后运行方式考虑,直流故障以后,系统安

全稳定控制装置会动作,以期将系统频率偏差恢复到允许范围之内。根据《三峡电力系统安全稳定控制装置初步设计》,可知现在主要采用的安全稳定控制措施有以下两种。

- a. 根据事故前直流功率大小,可以切除相对应的发电机容量,以利于系统频率的恢复。这种方法可以较迅速地恢复系统正常运行,但是会给电力系统造成直接经济损失和其他技术及设备上的损失。
- b. 利用直流系统自带的长期过负荷能力进行多回直流间的联合调制,即当一回直流故障时,提升非故障直流线路送电功率额定值的 10 % 来进行多回直流间的联合调制,同样也有利于系统频率的恢复。这种方法的优点是能够将本来应由交流系统承担的输送功率的损失转移至直流系统,使得送端系统减少切机容量,提高了送端系统的运行稳定性和供电可靠性。

综合对比,采用 b 方法更有利于电网的安全稳定运行,也更加经济。为了便于对比,将在采用直流功率提升措施以后,直流系统单极、双极闭锁时对三峡电网稳定性的影响分析结果也同时列于表 1 中。

由表 1 可以看出,当采用直流线路功率提升,在同样的直流故障下,三峡电网的最大频率偏差已经有所下降,但是效果并不明显,只显示在一定程度上提升了系统稳定运行的裕度。因此在此种故障情况下,若无特殊的要求,可以不启动直流功率提升,以减少对电器元件的损耗。但是在三常直流故障双极闭锁下,系统最大频率偏差仍然超出电网所规定指标,会对三峡电网造成冲击,危害性较大,必须尽快将频率拉回允许范围之内。因此,考虑采取必要的安全稳定控制措施来尽快恢复系统的频率。

为了找出较好的针对三峡—华东直流输电系统三常直流线路的稳定控制措施,再次进行模拟计算,将结果列于表 2 中进行比较。

表 2 2005 年夏大方式下三常直流系统故障对三峡电网稳定性的影响(不同的稳定控制措施下)

Tab.2 Impact of San-Chang HVDC faults on the stability of Three Gorges power system under 2005summer peak operation mode(with different generator trip schemes)

直流功率是否提升	单极闭锁		双极闭锁		切机	
	稳定性	$\Delta f_{\max}/\text{Hz}$	稳定性	$\Delta f_{\max}/\text{Hz}$	$\Delta f_{\max}/\text{Hz}$	t/s
否	稳定	0.15	失稳	0.25	0.19	0.3
是	稳定	0.12	失稳	0.21	0.18	0.3

注:t 为切除时间。

从表 2 可得知,当三常直流线路故障双极闭锁时,无功功率提升下,需要在 0.3 s 内切除三峡左一电站 4 台 700 MW 发电机组,才能使系统的最大频率偏差下降至 0.19 Hz。而同样故障情况下,启动直流功率提升后只需要在 0.3 s 内切除三峡左一电站 2 台 700 MW 发电机组,就可使系统的最大频率偏差下降至 0.18 Hz,使三峡电网恢复安全稳定运行。同时切除 4 台机组对系统和电网组件所造成的损失和危害是巨大的,一般不建议采用。而在采用直流调制

与切机措施配合下,也能达到相同的效果,显然更加优越。

4 结论

a. 2回直流线路直流故障,各自单极闭锁时,以及葛上直流线路双极闭锁时,三峡电网都可以保持稳定,最大频率偏差在 ± 0.2 Hz以内,暂可不采用直流功率提升措施。

b. 三常直流线路直流故障,双极闭锁时,启动直流功率提升后,三峡电网还必须在三峡左一电站切除2台700 MW机组才能保持系统稳定,频率在 (50 ± 0.2) Hz以内。

参考文献:

- [1] 李兴源. 高压直流输电系统的运行与控制[M]. 北京:科学出版社,1998.
- [2] 金小明,李兴源,刘红超,等. 南方电网多馈入直流与交流并联系统的稳定与控制研究[R]. 成都:西南电力设计院 & 四川大学,2002.
- [3] VOVOS N A, GALANOS G D. Enhancement of the transient stability of integrated AC/DC systems using active and reactive power modulation[J]. **IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems**, 1985, 104(7): 1696-1702.
- [4] RITIGGER J. Digital simulation of HVDC transmission and its correlation to simulator studies[A]. **International Conference on AC and DC Power Transmission, 1991** [C]. [s.l.]: [s.n.], 1991. 414-416.
- [5] DL 755-2001, 电力系统安全稳定导则[S].
- [6] 刘红超,李兴源,王路,等. 多馈入直流输电系统中直流调制的协调优化[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 5-9.
LIU Hong-chao, LI Xing-yuan, WANG Lu, *et al.* Coordination and optimization of HVDC modulations in multi-infeed HVDC transmission system[J]. **Power System Technology**, 2004, 28(1): 5-9.
- [7] 荆勇,杨晋柏,李柏青,等. 直流调制改善交直流混联系统暂态稳定性的研究[J]. 电网技术, 2004, 28(10): 1-4.
JING Yong, YANG Jin-bai, LI Bai-qing, *et al.* Research on improving transient stability of AC/DC hybrid system by HVDC modulation[J]. **Power System Technology**,

2004, 28(10): 1-4.

- [8] 徐政,高慧敏,杨靖萍. 南方电网中直流紧急功率调制的作用[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 24-26.
XU Zheng, GAO Hui-min, YANG Jing-ping. Effect of HD-VC emergent power modulation in south China power system[J]. **High Voltage Engineering**, 2004, 30(11): 24-26.
- [9] 余涛,沈善德,任震. 华中-华东多回HVDC紧急功率转移控制的研究[J]. 电网技术, 2004, 28(12): 1-4, 19.
YU Tao, SHEN Shan-de, REN Zhen. Research on emergency power shifting control of multi-circuit HVDC systems from central China power grid to East China power grid[J]. **Power System Technology**, 2004, 28(12): 1-4, 19.
- [10] 蔡泽祥,朱浩骏,白雪峰,等. 多馈入直流输电系统的动态特性及稳定控制与分析[J]. 华北电力大学学报, 2004, 31(5): 1-8.
CAI Ze-xiang, ZHU Hao-jun, BAI Xue-feng, *et al.* Dynamic characteristics stability control and analysis of multi-infeed HVDC transmission systems[J]. **Journal of North China Electric Power University**, 2004, 31(5): 1-8.
- [11] 黄莹,徐征,曾德文,等. 西电东送纯直流输电方案研究[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 1-4, 19.
HUANG Ying, XU Zheng, ZENG De-wen, *et al.* Study on pure DC transmission scheme for future power transmission from West China to East China[J]. **Power System Technology**, 2004, 28(19): 1-4, 19.
- [12] 余涛,沈善德. 华中-华东多回HVDC辅助功率/频率控制[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(1): 77-82.
YU Tao, SHEN Shan-de. Study on auxiliary power/frequency control of center China to East China multi-circuit HDVC links[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2005, 29(1): 77-82.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

陈荔(1980-),女,广东广州人,硕士研究生,主要从事电力系统规划和输电系统安全稳定运行问题的研究(E-mail: chenlily1980@tom.com);

刘会金(1952-),男,湖北大冶人,教授,博士研究生导师,研究方向是电力系统稳定性、电能质量控制、FACTS等;

陈格桓(1938-),男,广东兴宁人,高级工程师,副总工程师,从事电力系统规划、电站设计工作。

Transient stability analysis of multiple-loop HVDC system

CHEN Li¹, LIU Hui-jin¹, CHEN Ge-huan²

(1. Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Guangdong Electric Design Institute, Guangzhou 510600, China)

Abstract: The transient stability of Three Gorges-East China multiple-loop HVDC system under link faults is analyzed with BPA, including single pole blocking and double pole blocking. The measures to keep the system stable by power support and generator trip are studied. Calculative results show that, with single pole blocking of San-Chang or Ge-Shang HVDC link, the system is stable; with double pole blocking of Ge-Shang HVDC link, the system is also stable. While with double pole blocking of San-Chang HVDC link, the system is not stable until DC power support and multiple generator trip are implemented simultaneously.

Key words: Three Gorges power grid; HVDC; power support; generator trip