

永富直流受端电网电压稳定性研究

曾雪松¹ 徐志² 范文飞¹ 伍文城¹

(1. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021;

2. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217)

摘要: 永富直流是国内首个省内直流输电项目, 其受端富宁换流站接入的交流系统较弱, 换流站内装有固定串补和 STATCOM, 对系统安全稳定分析带来了挑战。基于静态稳定和时域仿真分析方法, 分析了富宁换流站所在地区电网在 $N-1$ 和严重故障下的静态电压稳定和暂态稳定, 研究了富宁换流站 STATCOM 接入后对系统电压稳定性的影响, 为大容量直流接入弱交流系统的稳定分析提供了新思路。

关键词: 永富直流; 电压稳定性; 静态电压稳定; 区域有功功率裕度; 暂态稳定; STATCOM

Abstract: Yongfu HVDC (YFDC) project is the first provincial HVDC project in China. As the receiving end of Yongfu HVDC, Funing inverter station is connected to weak AC system, and installed with fixed serial capacity (FSC) and STATCOM, which has brought challenge to the security analysis of power grid. Firstly continuation power flow method is used to analyze the voltage stability of the AC/DC power transmission system around YFDC. Then, time-domain simulation analysis is carried out to study the transient stability under $N-1/N-2$ contingencies. Finally, the effects of STATCOM on the voltage stability of the AC/DC hybrid system is analyzed, which provides a new idea for the security analysis of the large-capacity HVDC connected to the weak AC system.

Key words: Yongfu HVDC project; voltage stability; static voltage stability; regional load active power margin; transient stability; STATCOM

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)05-0010-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.05.003

0 引言

云南永富直流工程主要为满足观音岩水电站 3 000 MW 电力送出而建设, 直流工程起点位于云南省楚雄州永仁县永仁换流站, 落点位于云南省文山州富宁县富宁换流站, 工程于 2016 年 7 月正式竣工投产。

永富直流受端富宁换流站位于云南电网文山地区, 接入交流系统较弱, 最小三相短路电流云南侧和广西侧分别仅为 8.0 kA 和 7.1 kA, 对应永富直流送电 3 000 MW 时有效短路比 ESCR 分别为 1.8 和 1.6, 直流运行条件较差。

为达到云南电网与南方电网主网异步运行的目的, 富宁换流站接入系统方案满足 3 000 MW 全送广西或全送云南, 以及单极 1 500 MW 分送广西、云南 3 种运行方式的要求。为改善受端弱交流系统条件下直流运行条件, 在 500 kV 富宁换流站一靖西变

电站双回、500 kV 砚山变电站—富宁换流站双回线路均装设约 50% 补偿度的串补装置, 在富宁换流站装设 3 组 ± 100 Mvar 的 STATCOM 装置, 如图 1 所示。永富直流属于大容量直流接入弱交流系统受端, 对此类系统其电压稳定性是需要重点关注的问题^[1-4]。此外, 富宁换流站还存在常规直流两极分送、STATCOM 及固定串补技术集中使用情况, 交直流交互影响更为复杂, 需采用多种手段进行研究。

下面基于静态稳定和时域仿真分析方法, 分析了富宁换流站所在地区电网在 $N-1$ 和严重故障下的静态电压和暂态稳定问题, 研究了富宁换流站 STATCOM 接入后对系统电压稳定性的影响。

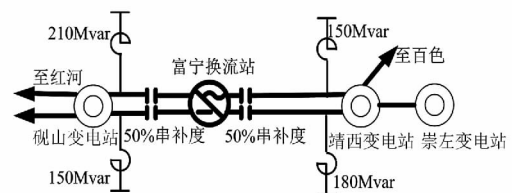


图 1 富宁换流站接入系统方案

1 静态电压稳定分析方法

1.1 静态电压稳定分析的基本原理

目前常用的静态电压稳定分析(以下简称静稳分析)方法均是基于潮流雅克比矩阵的最小奇异值与系统静稳极限之间存在对应关系,采用连续潮流方法求解常规的潮流代数方程,求取 $P-V$ 曲线和(或) $V-Q$ 曲线获得裕度指标^[5]。

连续潮流法指运用连续方法跟踪系统潮流方程稳态运行点随负荷或发电输出变化而变化的解曲线,它通过在常规潮流方程中引入一个变化参数并增加一维校对方程,采用预估-校正策略巧妙地解决当系统运行点接近临界点时潮流不收敛的难题,能顺利地穿过“鼻点”而不会有雅克比矩阵奇异的数值问题。

连续潮流计算方法主要有弧长连续法、局部参数法、延拓法等,主要包括方程参数化、预测环节、校正环节和步长控制4个环节。

通过不断增加区域负荷及联络线的功率,求解每个传输水平上的潮流解,可得到某监测母线上的 $P-V$ 曲线,可直观展示节点电压与负荷功率增长之间的曲线关系,如图2所示。在每个传输水平上均需要对可能的 $N-1$ 、 $N-2$ 故障进行扫描和筛选,确保筛选出最严重 $N-1$ 、 $N-2$ 故障。当潮流不能收敛时(雅克比矩阵奇异),即为稳定极限。 $P-V$ 曲线“鼻点”即为最大功率极限点。通过上述方法,可求出测试区域或联络线的静态稳定极限和系统的稳定裕度^[5]。

所采用的分析方法为基于连续潮流法的 $P-V$ 曲线分析方法,采用电力系统分析综合程序(PSASP)的静态电压稳定分析模块作为计算工具。

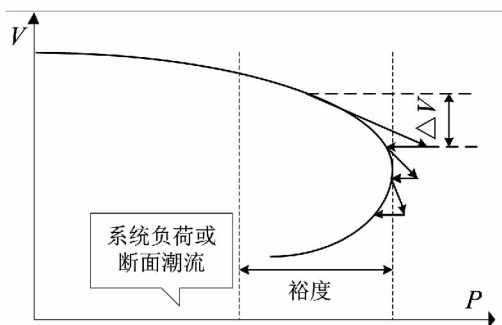


图2 连续潮流法

1.2 静态电压稳定主要指标说明

1) 区域负荷有功功率裕度

$$K_p = \frac{P_{max} - P}{P} \times 100\% \quad (1)$$

式中 P 、 P_{max} 分别为区域正常有功和临界有功。

研究采用以下准则^[6]:在区域最大有功或最大断面潮流下,

- ①正常或检修方式下,应 $K_p > 8\%$;
- ② $N-1$ 方式下 $K_p > 5\%$;
- ③ $N-2$ 方式下 $K_p > 2.5\%$ (WECC 标准)。

2) 母线负荷无功功率裕度

$$K_q = \frac{Q_{max} - Q}{Q} \times 100\% \quad (2)$$

式中 Q 、 Q_{max} 分别为初始、临界点的无功功率值。

推荐采用以下准则^[6]:在区域最大有功或最大断面潮流下, $N-1$ 方式下的 K_q 应大于 5% ,且应小于正常或检修方式下的 K_q 。

3) 节点电压的要求

①500 kV 及以上母线以及发电厂和 500 kV 变电站的 220 kV 母线正常运行方式时,电压允许偏差为系统额定电压的 $0\% \sim +10\%$;事故运行方式时为系统额定电压的 $-5\% \sim +10\%$ 。

②220 kV 变电站的 220 kV 母线以及发电厂和变电站的 35 ~ 110 kV 母线正常运行方式时,电压允许偏差为系统额定电压的 $-3\% \sim +7\%$;事故运行方式时为系统额定电压的 $\pm 10\%$ 。

4) 支路过载限制

检查计算区域内 220 kV 及以上的变压器和线路、变压器线路支路,故障前后均按照 1.0 倍额定电流考虑。

2 富宁换流站近区电网电压稳定性分析

对富宁换流站近区电网电压稳定性进行仿真分析,基于的运行方式如下:

1) 直流运行工况

永富直流的运行工况考虑了两种:分别为永富直流 3 000 MW 全送云南或全送广西两种工况。

2) 云南电网运行方式

云南电网计算负荷模拟到 110 kV 母线,基于 2018 年云南电网丰水期大负荷的典型运行方式。

2.1 静态电压稳定分析

对永富直流受端电网进行静态电压稳定性分析时,原则如下:

1) 负荷增长:永富直流受端所在地文山地区电网负荷增长,最大负荷增长量设置为4 000 MW。

2) 发电机出力增长:云南接入500 kV的主要大电源和永富直流受端所在地文山地区电网接入的电源。

3) 节点电压越限检测:设定计算区域内500 kV和220 kV母线节点电压满足1.0~1.1 p. u.,另外设置计算区域内全部发电机节点限制为0.95~1.05 p. u.。

4) 对该地区N-1、N-2故障进行了筛选,挑选了最为严重的4个故障进行静态电压稳定分析。4个故障分别为:500 kV砚山变电站—富宁变电站线路N-1、N-2故障,500 kV红河变电站—砚山变电站线路N-1、N-2故障。

2018年丰大方式下,永富直流受端所在地文山地区电网负荷有功功率裕度见表1,2018年丰大正常方式下P-V曲线如图3所示(其余P-V曲线略)。静态电压稳定分析表明:

1) 永富直流3 000 MW送电广西时,文山地区的有功功率裕度为44.89%,极限功率为2 866.5 MW;相对严重的故障为500 kV红河变电站—砚山变电站线路三相短路故障,该线路N-1、N-2故障时文山地区的有功功率裕度分别为40.61%和

26.24%,均满足相关导则要求。

2) 永富直流3 000 MW送电云南时,文山地区的有功功率裕度为27.80%,极限功率为6 362.5 MW;相对严重的故障为500 kV红河变电站—砚山变电站线路三相短路故障,该线路N-1、N-2故障时文山地区的有功功率裕度分别为27.41%和23.91%,均满足相关导则要求。

3) 从静态电压稳定计算结果来看,相较于永富直流3 000 MW送电广西,2018年丰大永富直流3 000 MW送电云南时,受端电网文山地区的受电规模增加,相当于馈入了相应容量的电源,文山地区的极限功率有所提高,但该地区的有功功率裕度呈下降的趋势。

2.2 暂态稳定分析

尽管静态电压稳定分析为大规模电网的电压稳定分析提供了一种快速且可通览全貌的分析方法,但是静态方法给出的结果常常具有一定的保守性,需通过时域仿真工具进行校核^[7]。因此,基于前述静态结果,采用时域仿真工具对2018年丰大方式下富宁换流站近区电网的暂态稳定进行分析,研究采用PSD-BPA暂态稳定程序,计算中考虑的模型如下:

1) 发电机模型

发电机采用Eq''、Ed''变化模型,考虑自动励磁

表1 文山地区电网静态电压稳定计算结果

方 式	永富直流3 000 MW 送电广西			永富直流3 000 MW 送电云南		
	初始有功/MW	极限有功/MW	$K_p / \%$	初始有功/MW	极限有功/MW	$K_p / \%$
丰大正常方式	1 978.4	2 866.5	44.89	4 978.4	6 362.5	27.80
砚山—富宁 N-1	1 978.4	2 812.1	42.14	4 978.4	6 195.8	24.45
砚山—富宁 N-2	1 978.4	2 777.0	40.37	4 978.4	5 834.1	17.19
红河—砚山 N-1	1 978.4	2 781.8	40.61	4 978.4	6 343.1	27.41
红河—砚山 N-2	1 978.4	2 497.6	26.24	4 978.4	6 168.5	23.91

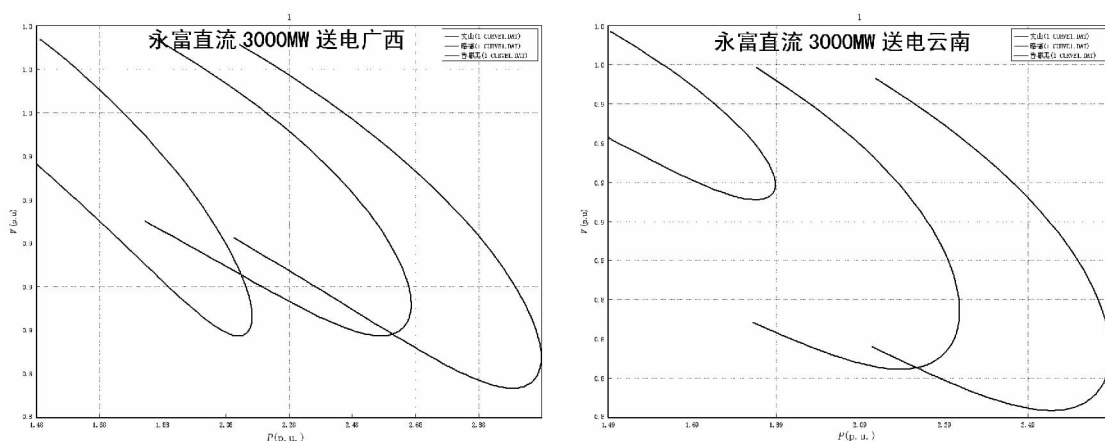


图3 P-V曲线

调节装置、调速器作用,机组容量大于 20 MW 的机组均投入 PSS 机组阻尼系数 D 取 0。

2) 直流模型

云广、溪洛渡、糯扎渡、金中、永富、鲁西背靠背直流系统采用 PSD - BPA 程序中的两端直流详细模型,考虑直流控制系统作用,控制方式为定功率,不考虑调制功能。

3) 负荷模型

负荷采用考虑频率特性的 ZIP 静态模型,由恒定阻抗、恒定电流、恒定功率并计及频率特性因子组成的综合负荷模型,对应于 PSD - BPA 程序中的 LB 型负荷模型,具体为:

云南电网: 30% 恒定阻抗, 30% 恒定电流, 40% 恒定功率;

广西电网: 30% 恒定阻抗, 40% 恒定电流, 30% 恒定功率;

有功负荷的频率因子 LDP 取为 1.2, 无功负荷频率因子 LDQ 取为 -2.0。

4) STATCOM

富宁换流站考虑投入 3 组 ± 100 Mvar 容量的 STATCOM 装置。

在上述计算条件下,2018 年丰大方式,永富直流受端所在地文山地区电网的暂态稳定分析计算结果如下:

1) 永富直流 3 000 MW 送电广西时,文山地区的有功功率裕度为 109.9%, 极限功率为 4 153.5 MW; 永富直流 3 000 MW 送电云南时,文山地区的有功功率裕度为 13.3%, 极限功率为 5 640.0 MW, 均满足相关导则要求。

2) 文山地区负荷逐渐增长至极限功率时,500 kV 红河变电站一砚山变电站线路 $N - 1$ 故障后出现电压失稳现象,系统不能够保持稳定。具体电压越限点为文山地区 110 kV 空山站为代表的负荷站点,故障后对应 110 kV 母线电压低于 0.75 p. u. 超过 50 Hz,如图 4 所示。

3) 永富直流 3 000 MW 送电广西时,永富直流发生双极闭锁和 500 kV 红河变电站一砚山变电站一富宁换流站线路发生 $N - 2$ 故障后,系统均能保持稳定;永富直流 3 000 MW 送电云南时,500 kV 红河变电站一砚山变电站一富宁换流站线路发生 $N - 2$ 故障后,系统失稳。

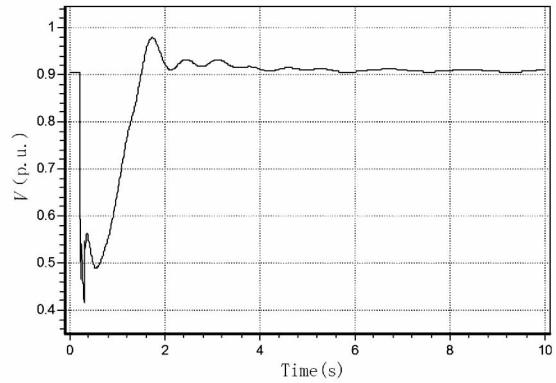


图 4 空山变电站 110 kV 电压曲线

3 富宁换流站 STATCOM 对弱交流系统电压稳定性影响分析

富宁换流站装设 3 组 ± 100 Mvar 的 STATCOM 装置后,提升了文山地区这种典型的受端电网的无功储备,同时 STATCOM 有着较快的响应速度,故障后为电网提供较好的电压支撑,提高了文山地区的安全稳定水平。对 STATCOM 的接入对文山地区电压稳定性的影响进行时域仿真分析,研究主要基于永富直流 3 000 MW 送电云南时的丰大运行方式。

时域仿真的故障为 500 kV 红河变电站一砚山变电站线路发生 $N - 1$ 故障。故障后富宁换流站 500 kV 交流母线电压曲线如图 5 所示,STATCOM 的无功出力曲线如图 6 所示,永富直流熄弧角曲线如图 7 所示。由仿真结果可以看出:

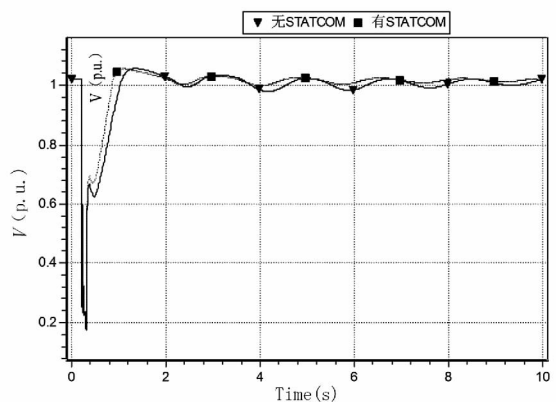


图 5 富宁换流站 500 kV 电压曲线

1) STATCOM 在故障后暂态过程中最大发出了约 +354 Mvar(+ 为容性, - 为感性,下同) 的无功功率,向系统提供电压支持;在故障恢复过程中,STATCOM 的无功功率范围在 -70 ~ +107 Mvar 之间,最后基本稳定在 20 Mvar。有 STATCOM 时,500 kV 富

宁变电站的电压在由 1.020 p. u. 提升至 1.024 p. u. , 500 kV 砚山变电站的电压由 1.024 p. u. 提升至 1.027 p. u. 220 kV 文山变电站的电压由 1.012 p. u. 提升至 1.014 p. u. 220 kV 马关变电站的电压由 1.009 p. u. 提升至 1.011 p. u. ,其余文山地区的各厂站的电压水平均有不同程度提升。

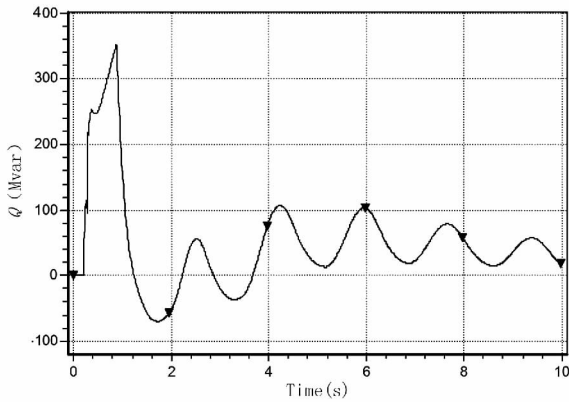


图6 富宁换流站 STATCOM 无功出力曲线

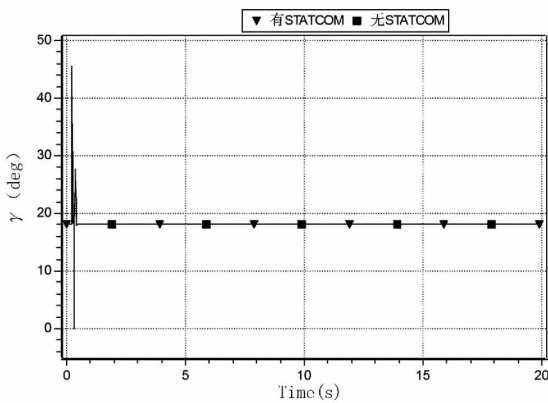


图7 永富直流熄弧角

2) 直流母线电压在故障后迅速下跌至 0.9 p. u. 以下,富宁换流站熄弧角跌至 7° 以下,直流发生换相失败。故障消失后富宁换流站熄弧角逐渐恢复,直流功率逐渐提升,直流功率在 1.0 s 左右达到额定功率。在故障过程中,STATCOM 在故障发生 20 ms 后迅速响应,为系统提供电压支撑,最大无功出力达到 +322 Mvar;从仿真曲线可以看出,相较于无 STATCOM 时,富宁换流站 500 kV 交流母线电压恢复更快,恢复后的电压稳态值更高,直流功率换相失败后的恢复过程也更快。

4 结 语

1) 永富直流受端电网静态电压稳定分析: 2018 年丰大方式永富直流 3 000 MW 送电广西时,文山地

区的有功功率裕度为 44.89%;永富直流 3 000 MW 送电云南时,文山地区的有功功率裕度为 27.80%。上述两种直流运行工况下,发生 N-1、N-2 故障后文山地区的有功功率裕度均满足相关导则要求。

2) 永富直流受端电网暂态稳定分析:永富直流 3 000 MW 送电广西时,文山地区的有功功率裕度为 109.9%;永富直流 3 000 MW 送电云南时,文山地区的有功功率裕度为 13.3%,均满足相关导则要求。永富直流送电云南时,500 kV 红河变电站—砚山变电站—富宁换流站线路发生 N-2 故障后,系统失稳,稳定水平较永富直流送电广西时下降。

3) 富宁换流站 STATCOM 对弱交流系统电压稳定性影响:富宁换流站装设 3 组 ±100 Mvar 容量的 STATCOM 装置后,提升了文山地区这种典型的受端电网的无功储备;同时 STATCOM 有着较快的响应速度,故障后为电网提供了较好的电压支撑,使得直流在换相失败后的恢复过程中更为迅速,富宁换流站 STATCOM 提高了文山地区电网的安全稳定水平。

参考文献

- [1] Kunder P. Power System Stability and Control [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 351 - 354.
- [2] TAYLOR C W. 王伟胜,译. 电力系统电压稳定 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [3] Van Thierry C, Costas V. Voltage Stability of Electric Power Systems (1 ed.) [M]. Springer, 2007.
- [4] Van T Cutsem. Voltage Instability: Phenomenon, Countermeasures and Analysis Methods [J]. IEEE Proc., 2000(88): 208 - 227.
- [5] 陈刚,李鹏,门锐. 静态电压稳定分析在南方电网应用研究[J]. 南方电网技术, 2013, 7(2): 16 - 20.
- [6] 中国南方电网有限责任公司企业标准. Q/CSG 11004 - 2009 南方电网安全稳定计算分析导则 [S]. 广州: 中国南方电网有限责任公司, 2009.
- [7] 范成围,陈刚,王晓茹. 大规模电力系统静态电压安全评估[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2263 - 2271.

作者简介:

曾雪松(1984) 工程师,主要从事电力系统规划与设计;

徐志(1984) 高级工程师,主要研究方向为继电保护与电能质量;

范文飞(1989) 助理工程师,主要从事电力系统规划与设计;

伍文城(1977) 高级工程师,主要研究方向为电力系统规划、电力系统仿真技术及电力市场。

(收稿日期: 2017 - 08 - 14)