

# 祁韶特高压直流投运后湖南电网电压稳定问题

杨丹<sup>1</sup>, 党杰<sup>2</sup>, 邱威<sup>3</sup>, 徐遐龄<sup>2</sup>, 陈道君<sup>4</sup>, 刘静<sup>1</sup>

(1. 国网湖南省电力有限公司, 湖南长沙 410004; 2. 国家电网有限公司华中分部, 湖北武汉 430077;  
3. 国家电网有限公司, 北京 100031; 4. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 湖南长沙 410007)

**摘要:**湖南电网负荷、电源分布不均, 负荷中心的电压稳定问题一直是威胁电网安全稳定运行的重要隐患。2017年±800 kV 祁韶特高压直流投运后, 电压稳定问题也更为突出。分析暂态电压与功角稳定的关系, 并从受端电网有效短路比、静态电压稳定、负荷特性等方面分析特高压直流投运后的电压稳定问题。结果表明, 引起电压失稳的“敏感点”、电压稳定的“薄弱点”和特高压直流的落点均位于负荷中心湘东电网。通过加强湖南省内部电网结构可以提高有效短路比, 但同时导致大扰动后电压跌落更为严重。加强湖南电网与华中主网的连接, 可以有效地提高电压稳定水平。在网架结构短时间内无法加强的前提下, 减小鹤岭变短路容量或优化直流逆变站参数均可以提高暂态电压稳定水平。

**关键词:**电压稳定; 有效短路比; 湖南电网; 特高压直流; 参数优化

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.06.022 中图分类号:TM732 文章编号:1673-9140(2020)06-0163-08

## Study on voltage stability of Hunan power grid integrated with Qi-Shao UHVDC transmission line

YANG Dan<sup>1</sup>, DANG Jie<sup>2</sup>, QIU Wei<sup>3</sup>, XU Xialing<sup>2</sup>, CHEN Daojun<sup>4</sup>, LIU Jing<sup>1</sup>

(1. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410004, China; 2. Central China Branch of State Grid Corporation of China, Wuhan 430077, China; 3. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 4. Electric Power Research Institute, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410007, China)

**Abstract:** The voltage stability problem of load center threatens the safe operation of Hunan power grid due to the unbalanced distribution of loads and sources, especially after integrating with ±800 kV Qi-Shao UHVDC transmission line in 2007. In this paper, the relationship between the transient voltage and angle stability is analyzed. In addition, the voltage stability is also analyzed for power grid integrated with UHVDC in the aspects of the effective short circuit ratio (ESCR), static voltage stability and load characteristics. It is shown that the sensitive spot, weak spot of voltage stability and the UHVDC links location are all located in Xiangdong power grid. The ESCR can be increased by shortening the electrical distance of the internal structure in Hunan power grid. However, the voltage sag would be more serious when suffering a large disturbance. The voltage stability level of Hunan grid can be improved effectively by reinforcing the connection between Hunan and Central China power grid. Since the grid structure cannot be strengthened within a short period, the transient voltage stability level of Hunan power grid can be improved by de-

收稿日期:2019-09-11;修回日期:2020-01-11

基金项目:国网湖南省电力有限公司科技项目(5216A5180018)

通信作者:杨丹(1982-),女,硕士,高级工程师,主要从事电力系统运行与控制的研究;E-mail:37103773@qq.com

creasing the short circuit capacity of Heling substation or optimizing the parameters of UHVDC inverter station.

**Key words:** voltage stability; effective short circuit ratio (ESCR); Hunan Power Grid; ultra-high voltage direct current (UHVDC); parameters optimization

湖南电网通过三回 500 kV 交流线与华中主网联络,通过一回±800 kV 特高压直流线与西北电网联络。500 kV 主网架结构如图 1 所示。负荷主要分布在东部、南部地区,电源主要集中在北部、西部地区。湘东地区负荷占全省负荷的 40%,而该地区的装机容量仅占全省装机的 10%,受电比例接近 70%。仿真计算表明,位于湘东负荷中心的鹤岭变近区 500 kV 系统发生三相故障可能导致湘东、湘南地区暂态电压失稳,严重情况下还将导致湖南机组对华中主网功角失稳。

在祁韶特高压直流投产前、湘西南水电大发期间,受电力平衡的影响,负荷中心火电开机方式较小,500 kV 鹤岭变近区发生三相故障可能引发湖南电网电压、功角失稳。由于电压和功角失稳几乎同时发生,有观点认为湖南电网的暂态稳定问题是功角和电压交织的稳定问题<sup>[1]</sup>。当时的暂态稳定问题具有明显的跨区特点:在位于湘东的 500 kV 鹤岭变近区三相故障后,数百公里外的湘南地区电压跌落最为严重,而湘南地区的 500 kV 故障却并不会引起该地区的电压失稳<sup>[2-3]</sup>。

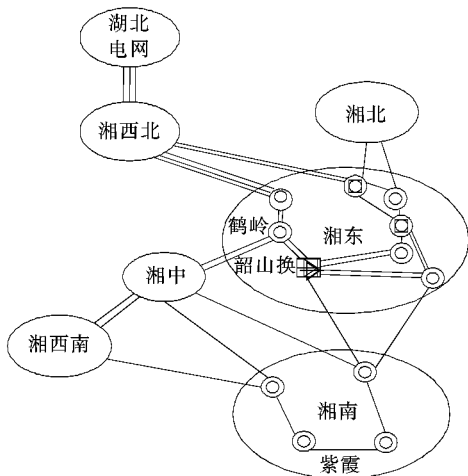


图 1 湖南 500 kV 网架结构

Figure 1 Sketch of Hunan 500 kV power grid

2017 年,祁韶特高压直流投运,受端落点韶山换流站位于湘东电网。由于直流送电功率替代了部分常规发电机组,电网发生故障后,直流从交流系统吸收大量无功功率,恶化了系统电压调节性能,湘东

负荷中心电压崩溃风险加剧。湖南电压稳定的薄弱点由湘南电网转移至湘东电网。文献[4]构建了暂态电压稳定指标,并将该方法应用于直流投运后湖南电网运行控制策略的制定。

## 1 电压稳定问题机理研究

暂态电压稳定问题是指电力系统发生大扰动后,伴随发电机之间的相对摇摆,某些负荷母线电压发生不可逆转的突然下降的失稳过程,而此时系统发电机间的相对摇摆可能并未超出使电力系统功角失稳的程度<sup>[5]</sup>。

### 1.1 与功角稳定的关系

暂态电压稳定通常与暂态功角稳定密切相关,两者很难从机理上完全分开,但是在很多情况下某种失稳形式占主导地位。通过分析大扰动后功角和电压的变化趋势和变化速率可以进一步厘清暂态过程中两者的关系。

鹤岭母线三相故障后的机组功角曲线如图 2 所示,湘西南地区机组功角摆开幅度明显大于湖南其他地区机组,但最大功角差基本都在 60°以内。

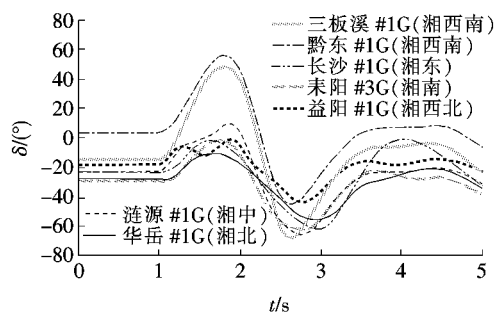


图 2 暂态稳定方式下的功角曲线

Figure 2 Power angle curves in transient stability mode

通过延长仿真计算中的故障切除时间,使得故障后功角电压失稳,观测故障后 2 s 内的功角、电压变化,如图 3 所示。故障后 0.7 s 时位于湘东地区的长沙电厂 #1 机功角已经开始回摆,而电压仍处于下降阶段;故障后 1.4 s 时鹤岭 500 kV 母线电压已跌落至 0.53 p. u.,长沙电厂 #1 机功角再度摆开

并增大。位于湘西南地区的三板溪电厂#1机功角虽然单调增大,但是功角存在回摆的趋势。

对故障后机组功角曲线求导,可以计算出功角变化速率。分析故障后2 s内的湘西南主要电源的功角变化速率,如表1所示,在故障后1.3 s时湘西南电源的功角变化速率下降至 $34(^{\circ})/s$ 左右,而在故障后1.6 s后功角变化速率又开始逐步增大。可见,在故障后的暂态过程中,湘西南机组的功角均存在回摆趋势,但是由于电压的跌落,功角再度摆开。

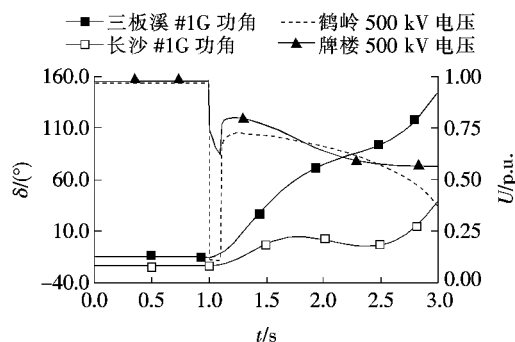


图3 暂态失稳方式下的功角电压曲线

Figure 3 Power angle and voltage curves in transient instability mode

表1 湘西南机组功角变化速率

Table 1 Power angle change rate of generators in southwestern Hunan

时间/ s	功角变化速率/ $(^{\circ})/s$		
	三板溪#1G	白市#1G	黔东#1G
0.1	27.1	25.9	19.6
0.4	132.8	128.1	105.4
0.7	91.2	98.6	97.6
1.0	54.1	50.2	37.4
1.3	33.8	33.3	34.2
1.6	54.0	58.8	73.6
2.0	162.3	156.9	146.5

一般而言,如果在远离负荷的输电系统某点电压发生崩溃,这是一个功角失稳问题;而如果在负荷区域某点电压发生崩溃,则可能主要是电压失稳问题<sup>[6]</sup>。由图3可见,位于湘东负荷中心地区的鹤岭变电站电压跌落程度远大于位于湘西南地区的牌楼变。因此,鹤岭500 kV近区三相故障引发的稳定问题可以定性为暂态电压稳定问题。

## 1.2 直流受端电网有效短路比

直流输电系统落入受端交流电网的落点选择需要考虑交直流系统的相互作用,主要包括有效短路

比、受端系统的有功功率损耗等指标<sup>[7]</sup>。在规划阶段,通常使用有效短路比( $I_{ESCR}$ )来衡量交直流系统中交流系统的强弱,即

$$I_{ESCR} = \frac{S_{ac} - Q_{cN}}{P_{dN}} \quad (1)$$

式中  $S_{ac}$  为交流系统短路容量; $Q_{cN}$  为无功补偿容量; $P_{dN}$  为直流额定输送容量。

一般认为  $I_{ESCR} > 5$  时为强系统; $3 \leq I_{ESCR} \leq 5$  时为中强系统; $I_{ESCR} < 3$  时为弱系统<sup>[8]</sup>。按照额定功率8 000 MW计算,受端有效短路比计算值为4.3,满足中强系统要求。

## 1.3 静态电压稳定裕度

静态电压稳定也称小扰动电压稳定,指电力系统受到诸如负荷增加等小扰动后,系统所有母线维持稳定电压的能力。

衡量静态电压稳定的区域负荷有功功率裕度  $K_p$  定义为

$$K_p = \frac{P_{max} - P}{P} \times 100\% \quad (2)$$

式中  $P_{max}$  为临界运行点的有功功率值; $P$  为初始有功功率值。

采用PSASP(电力系统分析综合程序)计算的特高压直流受端电网静态电压稳定裕度结果如表2所示,湘东地区的静态电压稳定裕度远低于同为特高压直流落点的苏州南部、浙江宁绍地区。

表2 特高压直流受端静态电压稳定裕度

Table 2 Static voltage stability margin of UHVDC receiving end %

地区	静态电压稳定裕度	
	正常方式	N-1故障后方式
湘东(祁韶直流)	9.2	5.8
苏南(锦苏直流)	27.3	21.3
宁绍(灵绍直流)	14.1	12.0

正常方式的区域负荷有功功率裕度应大于8%;N-1故障后方式区域负荷有功功率裕度应大于5%<sup>[9]</sup>。湘东地区的静态电压稳定裕度略高于计算规范要求。随着湘东电网负荷的增长,如果内部电源装机容量维持不变,静态电压稳定裕度将下降。

## 1.4 电压稳定“敏感点”

在进行系统暂态电压稳定分析时,故障点应选取对系统稳定最不利的地点。一般情况下,系统中短路容量最大的母线发生三相短路故障对整个系统

的电压冲击最大。为了对比不同位置的故障点对全网电压的影响,在湖南省内 6 个片区内各选取 1 个 500 kV 三相短路容量最大的变电站作为观测对象。对比其 500 kV 母线发生三相故障后 1 s 内全省 500 kV 变电站平均母线电压的变化情况,如表 3 所示。

在选择的 6 个变电站中,从电压跌落程度以及恢复速度来看,鹤岭 500 kV 母线三相故障导致全省电压跌落的时间及幅度最大。鹤岭变是整个湖南电网电压稳定的“敏感点”,故障点距离鹤岭 500 kV 母线越近越严重。

表 3 故障后全省 1 s 内 500 kV 母线平均电压对比

Table 3 Average voltages comparison of 500 kV buses at 1 s after failure

地区	平均电压/p. u.				
	0 s	0.05 s	0.1 s	0.5 s	1 s
复兴(湘西北)	0.99	0.42	0.70	0.74	1.02
鹤岭(湘东)	0.99	0.37	0.68	0.68	0.75
罗城(湘北)	0.99	0.56	0.78	0.95	1.02
牌楼(湘西南)	0.99	0.69	0.84	0.98	1.02
船山(湘南)	0.99	0.53	0.76	0.92	1.03
民丰(湘中)	0.99	0.52	0.74	0.89	1.04

### 1.5 感应电动机负荷特性

感应电动机是电力系统负荷的重要组成部分,占系统负荷总量的 60% 左右。感应电动机负荷转子运动方程为

$$T_j \frac{ds}{dt} = T_m - T_e \quad (3)$$

式中  $T_j$  为感应电动机惯性时间常数;  $T_m$  为感应电动机的机械转矩;  $T_e$  为感应电动机的电磁转矩;  $s$  为感应电动机的滑差。

当电网发生故障后电压跌落,感应电动机机端电压降低时,电磁转矩  $T_e$  减小,从而  $ds/dt > 0$ ,滑差  $s$  开始增大。感应电动机消耗的总无功为

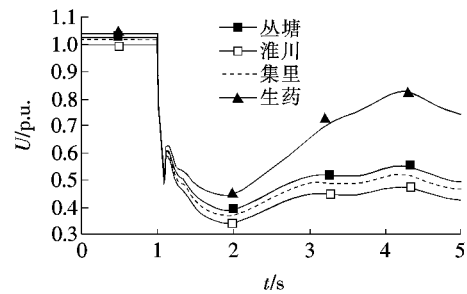
$$Q = \frac{U^2(X_1 + X_2)}{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2} + \frac{U^2}{X_m} \quad (4)$$

式中  $U$  为电压;  $X_1$  为定子漏抗;  $r_2$  为转子电阻;  $X_2$  为转子漏抗;  $X_m$  为励磁电抗。

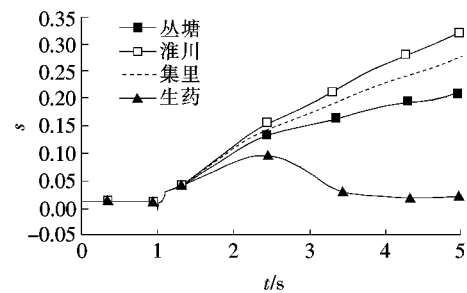
在故障后电压一定的情况下,滑差变大,感应电动机负荷将吸收更多的无功,如果系统缺乏动态无功支撑,将引起负荷接入点电压下降,电磁力矩  $T_e$  下降,滑差进一步加大,从而进入电压下降和滑差加大的恶性循环。感应电动机滑差增大降低了负荷功率

因数,同时使得输电线路被迫传输大量的视在功率,输电线路压降增大,感应电动机端电压继续下降,滑差继续增大,系统进入以感应电动机为核心的电压失稳正反馈动态过程<sup>[10]</sup>。

经仿真计算,在鹤岭近区 500 kV 三相故障后,湘东地区的淮川、丛塘、集里等变电站的负荷母线电压均跌落并维持在 0.5 p. u. 左右,以上负荷母线的暂态电压失稳与感应电动机滑差的单调增大同时存在,如图 4 所示。



(a) 负荷母线电压



(b) 感应电动机滑差

图 4 部分变电站电压失稳仿真曲线

Figure 4 Simulation curve of transient voltage instability in substations

## 2 影响因素分析

### 2.1 无功电源方式

在暂态过程中,电压下降,感应电动机、直流等吸收大量无功功率,交流滤波器、并联电容器提供的无功支撑大幅减少,动态无功支撑主要由发电机、调相机等无功电源提供。由于无功功率不能远距离输送,越靠近负荷中心的机组支撑效果越明显。对不同地区的 3 台 600 MW 机组以及并网于韶山换流站的 300 MVar 调相机大扰动后 1 s 内发出的无功功率增量进行比较,如表 4 所示,故障后的暂态过程中位于湘东地区的调相机、长沙 #1 机发出的无功功率增量较其他机组大很多。

调相机作为旋转设备,与 SVC、STATCOM 等

基于电力电子技术的动态无功补偿装置相比,既为系统提供短路容量,又有更好的无功出力特性。新一代大容量调相机具有少维护、瞬时无功支撑能力强、暂态无功响应快等技术优势<sup>[11]</sup>。

表 4 故障后发电机无功增量

Table 4 Reactive power increments of generators after a failure

时间/ s	无功增量/MVar			
	调相机 (湘东)	长沙#1G (湘东)	金竹山#1G (湘中)	黔东#1G (湘西南)
0.2	358	254	179	174
0.4	481	316	247	252
0.6	552	374	301	293
0.8	546	392	352	211
1.0	395	361	305	104

## 2.2 特高压直流方式

直流输电换流站换流器在换相时需要从交流系统吸收大量无功功率,且在有功功率增加时,换流器消耗的无功功率也增加,通常情况下,换流器消耗的无功功率为有功功率的 50%~60%。所需的无功功率大部分由换流站中的交流滤波器组的电容器来供给。大扰动后,换流器消耗的无功功率还随着换流站母线电压的低落进一步增加,而交流滤波器提供的无功支撑却由于电压跌落而减少,从而进一步恶化了暂态过程中的无功平衡<sup>[12]</sup>。

故障后 1 s 内直流系统向交流系统输送的有功功率  $P$  及交流系统向直流系统输送的无功功率  $Q$  如表 5 所示。故障前换流器消耗的无功功率基本由换流站内的无功补偿装置提供,直流系统向交流系统输送 38 MVar 的少量无功功率。在故障切除后直流有功功率恢复的过程中,直流系统由交流系统吸收了大量无功功率,最大达到 1 770 MVar,逆变站呈现出大容量动态无功负荷特性。

表 5 故障后交直流系统功率交换情况

Table 5 Power exchange between AC and DC system after a failure

时间/s	$P$ /MW	$Q$ /MVar
0.0	3 887	-38
0.2	2 733	1 348
0.4	2 808	1 619
0.6	3 001	1 704
0.8	3 266	1 770
1.0	3 677	1 587

## 2.3 负荷模型

负荷模型是影响电网暂态稳定水平的重要因素。湖南电网采用 35% 恒阻抗 + 65% 感应电动机的综合负荷模型。将负荷模型中的感应电动机比例由 65% 分别下调至 50%、35%,在故障后的暂态过程中,电压恢复速度提升明显,如图 5 所示。

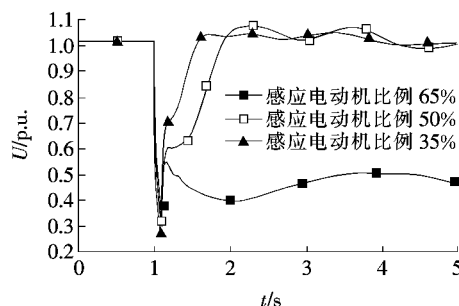


图 5 感应电动机比例敏感性分析

Figure 5 Sensitivity analysis of induction motor ratio

暂态电压稳定特性对负荷模型高度敏感,负荷模型的修正与变更必须基于充分的负荷特性参数辨识,并通过大扰动试验的论证。

## 2.4 电网连接强度

祁韶直流受端有效短路比计算值满足中强系统要求。在保证湖南交直流受电功率等边界条件不变的前提下,通过减小部分 500 kV 交流线路阻抗,进一步增大受端电网的短路容量及有效短路比,来研究大扰动后暂态电压特性的变化。

计算使用 2018 年夏季大负荷方式数据,湖南电网负荷为 28 000 MW,祁韶直流送湘功率为 4 000 MW,鄂湘 500 kV 交流联络线送湘功率为 1 300 MW。采用 3 种方式,即①基础方式;②华中与湖南 3 回 500 kV 交流联络线阻抗改为方式 1 的 0.5 倍;③湘东与外部相联的 11 回 500 kV 交流线阻抗改为方式 1 的 0.5 倍。3 种方式下韶山换流站以及鹤岭变的 500 kV 短路容量如表 6 所示,改变阻抗值后,韶山换流站短路容量均增大,有效短路比随之增大。

3 种方式下鹤岭近区三相故障后韶山换流站 500 kV 母线电压变化情况如图 6 所示,方式 2 电压恢复速度提高,方式 3 电压未恢复至 0.8 p.u. 以上,且故障切除后湖南机组对华中机组的功角失稳。

表 6 换流站近区 500 kV 短路容量

Table 6 500 kV short circuit capacity near converter station

方式	短路容量/(MV·A)		短路容量增量/%	
	韶山换	鹤岭变	韶山换	鹤岭变
1	36 963	39 809	—	—
2	37 500	40 546	1.5	1.9
3	39 700	43 583	7.4	9.5

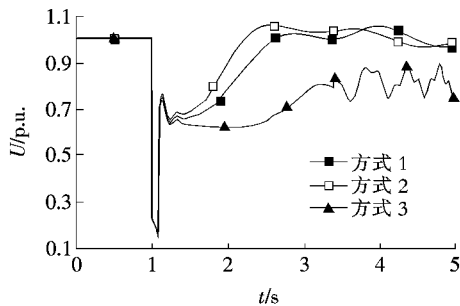


图 6 3种方式故障后韶山换500 kV 母线电压曲线

Figure 6 500 kV bus voltage of Shaoshan converter station after fault in 3 different operation modes

若仅用有效短路比来评价直流受端电网交流系统的强弱,则方式3的网架结构最强,但是方式3的暂态电压稳定水平最低。可见,有效短路比指标具有一定的局限性,用其评价直流系统对受端电网暂态电压稳定的影响存在缺陷<sup>[13-14]</sup>。

方式3加强了湖南电网内部的电气连接强度。由于韶山换流站与电压稳定“敏感点”500 kV 鹤岭变均位于湘东地区,在增大韶山换流站短路容量的同时也使得鹤岭变短路容量增加10%左右,进一步加大了鹤岭近区三相故障对全网的冲击。在鹤岭近区发生三相故障后,与湘东地区相邻的湘西北、湘中、湘南等地区的电压跌落幅度及时间均增大,在暂态过程中能向湘东电网提供的无功功率均减少,恶化了暂态电压特性。

方式2加强了湖南电网与华中主网的电气连接强度,韶山换流站及500 kV 鹤岭变短路容量增加均不到2%。虽然有效短路比提升不明显,但是在扰动后,华中主网对湖南电网整体支撑能力增强,暂态电压稳定水平明显提升。

因此,加强湖南电网内部各地区之间的电气连接对暂态电压稳定水平影响不明显,甚至有恶化作

用。加强湖南电网与华中主网的电气连接才能有效提高暂态电压稳定水平。

### 3 减小鹤岭短路容量提升稳定水平

通常情况下可以增加负荷中心的动态无功支撑,以此来提高暂态电压稳定水平。由于鹤岭变是湖南电压稳定的“敏感点”,通过减小鹤岭近区故障对全省的冲击同样可以提高暂态电压稳定水平。

将500 kV 鹤岭变位于同一串内的艾鹤Ⅱ线、韶鹤Ⅱ线出串运行,鹤岭变500 kV 短路容量降低,近区故障对电网冲击减小,暂态电压稳定水平提高。

在鹤岭变500 kV 韶鹤Ⅰ线装设固态限流器,系统正常运行时固态限流器对输电线路表现出“零阻抗”特性。在系统故障后,阻抗迅速增大,减小了短路电流,同时提高了系统的暂态稳定水平<sup>[15]</sup>。

对比艾鹤Ⅱ线、韶鹤Ⅱ线出串运行,在韶鹤Ⅰ线鹤岭变出口加装10 Ω 的电抗型固态限流器,2种方案下鹤岭近区三相故障后的韶山换500 kV 母线的暂态电压曲线如图7所示,可见减小鹤岭短路容量对暂态电压稳定水平提升明显。

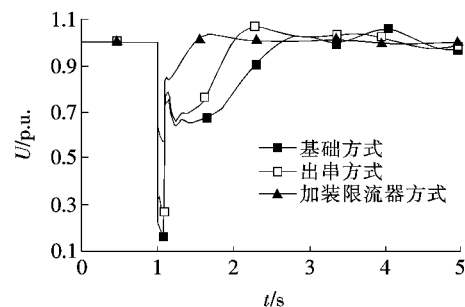


图 7 减小鹤岭短路容量效果

Figure 7 Effects of decreasing short circuit capacity in Heling

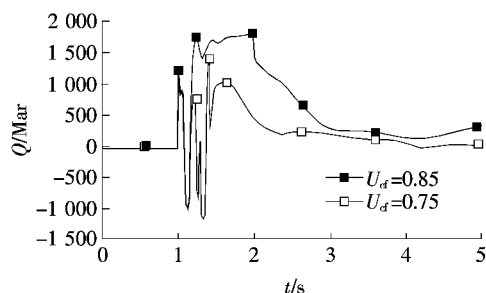
### 4 优化直流控制参数提升稳定水平

受端交流系统的电压稳定性与直流系统控制方式密切相关。直流换相失败预测控制在检测到将要发生换相失败时,通过快速减小逆变器触发角 $\alpha$ 可降低换相失败风险。由于直流换流站无功功率消耗与其触发角强相关,因此换相失败预测启动后,必将

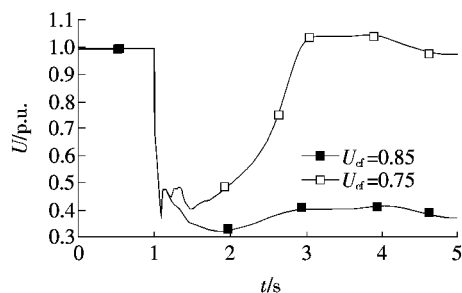
影响受端交流电网电压恢复特性,甚至恶化电压稳定性<sup>[16-20]</sup>。

换相失败预测控制模块中电压门槛值  $U_{cf}$ ,其取值决定在电压跌落过程中预测控制的启动时刻。通过减小  $U_{cf}$  参数,可使换相失败预测控制在更低的电压水平下启动,同时,可以减小电压跌落过程中逆变器从交流电网中吸收的无功功率。

对  $U_{cf}$  取值为 0.85 和 0.75 这 2 种情况进行仿真分析。当  $U_{cf}$  取 0.75 时,暂态过程中直流系统由交流系统吸收的无功功率较小,负荷母线电压的恢复速度较快,如图 8 所示。



(a)交流系统传至直流系统的无功功率



(b)负荷母线电压

图 8 换相失败参数优化效果

Figure 8 Effects of commutation failure parameter optimization

换相失败预测控制中的参数整定需要兼顾考虑换相失败对系统的威胁以及电压稳定风险。在电压稳定问题突出的直流馈入受端电网中,可以通过优化参数提升电压稳定水平。

## 5 结语

在中国特高压直流受端落点省份中,湖南电网的电压稳定问题尤为突出。仿真计算表明,500 kV 鹤岭近区发生三相故障可能导致湘东地区甚至整个湖南电网的电压大幅跌落,感应电动机“大滑差”特

性导致湘东电网部分变电站暂态电压失稳,严重情况下将导致主网电压崩溃,湖南对华中主网功角失稳,祁韶直流双极闭锁。

1)在现有网架结构下,需要根据负荷水平、直流运行功率合理制定负荷中心无功电源的方式,以保证故障后有足够的动态无功支撑。必要时可以采取减小鹤岭变 500 kV 短路容量、优化直流控制参数等措施,提高大扰动后的暂态电压稳定水平。

2)随着负荷不断增长,暂态电压稳定问题将更加突出,静态电压稳定裕度也不断下降。在负荷中心加装调相机或者 STATCOM 等静态无功补偿装置,可以提高暂态稳定水平和静态电压稳定裕度。

3)湖南电网内部 500 kV 主网架的加强对暂态电压稳定水平影响不明显,甚至有恶化作用。华中特高压交流环网的建设将加强湖南电网与华中主网的联络,改善湖南电网“强直弱交”的特性,提高湖南电网的电压稳定水平。

## 参考文献:

- [1] 国网湖南省电力有限公司. 2018 年湖南电网运行方式 [R]. 长沙:国网湖南省电力有限公司,2018.
- [2] 党杰,奚江惠,李勇,等. 湘西南水电送出能力对策研究 [J]. 电力科学与技术学报. 2017,32(2):173-178.  
DANG Jie, XI Jianghui, LI Yong, et al. Research on counter measures of hydropower transmission capacity in Southwest Hunan[J]. Journal of Electric Power Science and Technology. 2017,32(2):173-178.
- [3] 廖国栋,谢欣涛,侯益灵,等. 湖南电网暂态电压稳定性问题 [J]. 电网技术. 2012,36(10):196-202.  
LIAO Guodong, XIE Xintao, HUO Yiling, et al. Study on transient voltage stability of Hunan Power Grid[J]. Power System Technology, 2012,36(10):196-202.
- [4] 邱威,贺静波,于钊,等. 特高压直流馈入湖南电网的暂态电压稳定分析 [J]. 电力自动化设备, 2019,39(10): 168-173.  
QIU Wei, HE Jingbo, YU Zhao, et al. Transient voltage stability analysis of Hunan Power Grid with infeed UHVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10):168-173.
- [5] 周双喜. 电力系统电压稳定性及其控制 [M]. 北京:中国电力出版社,2003.
- [6] Taylor C W. 电力系统电压稳定 [M]. 王伟胜译. 北京:

中国电力出版社,2002.

- [7] 王康,刘崇茹,韩民晓,等. 兼顾稳定性与经济性的交直流系统直流落点选择方法[J]. 电力系统自动化,2011,35(24):73-78.  
WANG Kang, LIU Chongru, HAN Minxiao, et al. A method of selecting DC links termination at AC locations considering stability and economy at once[J]. Automation of Electric Power System, 2011, 35(24): 73-78.
- [8] KUNDER P. 电力系统稳定与控制[M]. 周孝信译. 北京:中国电力出版社,2001.
- [9] Q/GDW 1404-2015. 国家电网安全稳定计算技术规范[S].
- [10] 张文朝,张博,潘捷,等. 基于感应电动机网荷互馈特性的暂态电压失稳机理探析[J]. 电力系统自动化,2017,41(7):8-14.  
ZHANG Wenchao, ZHANG Bo, PAN Jie, et al. Mechanism analysis for transient voltage instability based on crossfeed characteristics between power network and load of induction motor[J]. Automation of Electric Power System, 2017, 41(7): 8-14.
- [11] 王雅婷,张一驰,周勤勇,等. 新一代大容量调相机在电网中的应用研究[J]. 电网技术,2017,41(1):22-28.  
WANG Yating, ZHANG Yichi, ZHOU Qinyong, et al. Study on application of new generation large capacity synchronous condenser in power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 22-28.
- [12] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2011.
- [13] 杨欢欢,蔡泽祥,朱林,等. 直流控制对直流系统无功动态特性及其对受端电网暂态电压稳定的影响[J]. 电力自动化设备,2017,37(10):86-92.  
YANG Huanhuan, CAI Zexiang, ZHU Lin, et al. Dynamic characteristic of HVDC reactive power and its influence on transient voltage stability of receiving-end power grid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 86-92.
- [14] 黄弘扬,徐政,许烽. 多馈入直流输电系统短路比指标的有效性分析[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):46-50.  
HUANG Hongyang, XU Zheng, XU Feng. Effectiveness of short circuit ratio index for multi-infeed HVDC system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11): 46-50.
- [15] 郝志杰,江道灼,蔡永华. 新型固态故障限流器对电力系统暂态稳定性的影响[J]. 电力系统自动化,2004,28(8):50-56.  
HAO Zhijie, JIANG Daozhuo, CAI Yonghua. Effect of novel fault current limiters on power system transient stability[J]. Automation of Electric Power System, 2004, 28(8): 50-56.
- [16] 郑超,周静敏,李惠玲,等. 换相失败预测控制对电压稳定性影响及优化措施[J]. 电力系统自动化,2016,40(12):179-183.  
ZHENG Chao, ZHOU Jingmin, LI Huiling, et al. Impact of Commutation failure prediction control on voltage stability and its optimization measures[J]. Automation of Electric Power System, 2016, 40(12): 179-183.
- [17] 雷前,鲍伟,瞿海妮,等. 多馈入直流系统无功补偿选址研究[J]. 中国电力,2019,52(3):56-60.  
LEI Qian, BAO Wei, QU Haini, et al. Site Selection for reactive power compensation of multi-infeed HVDC systems[J]. Electric Power, 2019, 52(3): 56-60.
- [18] 陈宝平,林涛,黄华,等. 一种新的静态电压稳定性评估指标[J]. 电力科学与技术学报,2018,33(3):37-43.  
CHEN Baoping, LIN Tao, HUANG Hua, et al. A new evaluation index for static voltage stability[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(3): 37-43.
- [19] 程艳,张健,管蓑,等. HVDC换相失败时受端电网的电压与频率联合控制策略[J]. 高压电器,2020,56(4):241-245.  
CHENG Yan, ZHANG Jian, GUAN Ti, et al. Coordinated control strategy of voltage and frequency support at receiving end of HVDC system under commutation failure[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4): 241-245.
- [20] 张国辉,李其莹,张海静,等. 基于电压灵敏度的交直流系统源网协调电压优化控制[J]. 智慧电力,2019,47(4):66-72+80.  
ZHANG Guohui, LI Qiyong, ZHANG Haijing, et al. Sensitivity-based optimal source-grid coordinated voltage control in AC/DC hybrid system[J]. Smart Power, 2019, 47(4): 66-72+80.