

湖南电网交直流受电能力分析 & 提升方案

杨 丹¹, 刘 静¹, 朱军飞¹, 钟 伟¹, 陈道君²

(1. 国网湖南省电力有限公司, 湖南 长沙 410004; 2. 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: 湖南省一次能源缺乏, 大量电力需要由省外供给, 现有网架结构下的受电能力无法满足负荷增长的需求, 电力缺口将逐年增大。湖北—湖南三回500 kV交流联络线输送能力受线路热稳定输送容量和湖南暂态稳定问题双重约束。甘肃—湖南±800 kV祁韶特高压直流受电能力与跨区跨省交流联络线输送极限、受端换流站近区潮流疏散等问题存在复杂的耦合关系。构建交直流协调控制系统, 可以降低大容量直流对交流系统的故障冲击, 同时提高湖南电网的直流受电能力。华中特高压交流环网的建设将改善湖南电网“强直弱交”的特性, 提高湖南电网的电压稳定水平和故障后交流电网的承载能力, 提高湖南电网的交直流整体受电能力。

关键词: 湖南电网; 受电能力; 特高压输电; 安全稳定控制; 暂态稳定

Study on improving AC-DC transmission capacity in Hunan power grid

YANG Dan¹, LIU Jing¹, ZHU Junfei¹, ZHONG Wei¹, CHEN Daojun²

(1. State Grid Hunan Electric Power Company Limited, Changsha 410004, China; 2. State Grid Hunan Electric Power Company Limited Research Institute, Changsha 410007, China)

Abstract: Because of primary energy deficiency, large amounts of electric power are supplied from outside the hunan province. The receiving capability of hunan power grid cannot meet the soaring demand for electricity. The transmission capacity of 500 kV alternating current lines from Hubei to Hunan are restricted by thermal stability of the transmission line and transient stability problem in Hunan. Coupling relationship exists among the transmission capacity of ±800 kV UHVDC from Gansu to Hunan, the steady state stability limit of 1 000 kV alternating current line from northern China to central China power grid, power flow distribution near Shaoshan converter station and transient voltage stability problem in Hunan power grid. Building coordinated AC/DC control system can reduce fault impact of large capacity HVDC and improve the receiving capacity in the meantime. The ultra-high voltage alternating current transmission network in central China will improve stable level of Hunan power grid. The anti-disturbance and power receiving capability of Hunan power grid will improve at the same time.

Key words: Hunan power grid; receiving capacity; ultra-high voltage transmission; security and stability control; transient stability

0 引言

湖南省“少煤、无气、无油”，电煤70%以上依靠外运，水电基本已经开发殆尽，风能属于第Ⅳ类资源区相对贫乏，是一次能源缺乏的内陆省份。随着经济的发展，电网负荷的增加，大量

电力需要由省外供给。

2017年以前，湖南电网仅通过三回500 kV交流线与湖北电网联络，由省外受入电力的能力约为2 700 MW。2017年6月，±800 kV祁韶特高压直流工程建成投产，提高了湖南电网接受外来电力的能力，一定程度上缓解了湖南省电力供应紧张的局面。但是，祁韶直流投运后系统的转动惯量

国网湖南省电力公司科技项目(5216A5180018)

水平和动态无功支撑能力均减小，“强直弱交”特性显现。另外，受湖南省500 kV交流断面转供能力、韶山换流站近区网架潮流疏散以及湖南电网暂态稳定问题等多种因素的影响，湖南接受外来电力的能力仍然无法满足负荷增长的需求。根据预测，2019~2022年，在现有网架结构没有发生根本性改善的前提下，湖南省将出现4 000~10 000 MW左右的电力缺口。提高湖南电网接受省外电力的能力是“十三五”末期亟待解决的问题^[1-2]。

1 交流受电能力分析

湖南省500 kV主网架结构如图1所示。湖南电网通过500 kV葛岗线、屏澧 I 线和屏澧 II 线三回500 kV交流线与湖北电网联络，其中葛岗线的热稳定输送容量为2 000 MW（环境温度为40 ℃）。三回500 kV省间交流联络线输送能力受葛岗线热稳定输送容量和湖南电网暂态稳定问题的双重约束。

1.1 葛岗线输送容量约束

500 kV屏澧 I 线、屏澧 II 线部分同杆架设，需要按照“N-2”进行校核^[3]。屏澧双回线发生“N-2”后，湖北输送至湖南的电力全部由500 kV葛岗线承担，可能导致葛岗线超过其热稳定输送容量。为提高湖南电网受电能力，同时保证故障后葛岗线不过载，通过鄂湘联络线安控系统实现了屏澧双回同跳切湖南电网负荷的措施。

1.2 湖南电网暂态稳定问题约束

暂态稳定问题一直是威胁湖南电网安全稳定运行的重要隐患。500 kV澧复 I 线、澧复 II 线也存在同杆架设，需按照“N-2”进行校核。500 kV澧复双回线复兴侧三相故障后，发生“N-2”可能导致湖南电网机组对华中电网失步，同时导致湖南电网电压失稳。

(1) 故障冲击分析

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

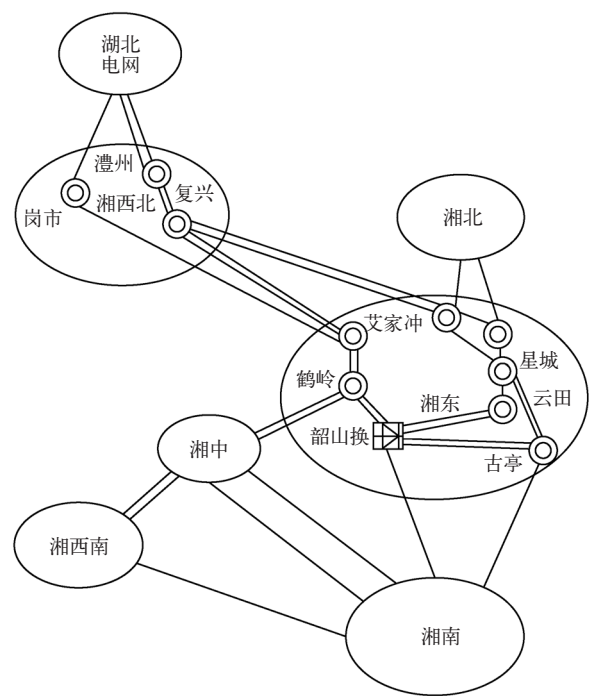


图1 湖南省500 kV网架结构

Fig.1 Sketch of Hunan 500 kV power grid

响，在湖南省内各个片区内各选取1~2个500 kV三相短路容量较大的变电站作为观测对象，对比其500 kV母线发生三相故障（0 s发生三相故障；0.09 s故障切除）后1 s内的暂态过程中全省500 kV变电站平均母线电压的变化情况。

由表1可以看出，在选择7个变电站中，500 kV三相短路容量最大的站点为湘西北的复兴变电站，其次是湘东的鹤岭变电站和沙坪变电站。

表1 各变电站500 kV三相短路容量

Table 1 There-phase short-circuit capacity of substation in different part of Hunan

	500 kV三相短路电流/kA	500 kV三相短路容量/MV·A
复兴(湘西北)	48.7	44 283
鹤岭(湘东)	46.3	42 101
罗城(湘北)	30.9	28 097
牌楼(湘西南)	24.7	22 460
船山(湘南)	29.6	26 915
民丰(湘中)	35.9	32 644
沙坪(湘东)	45	40 919

由表2可以看出，在选择7个变电站中，从电压跌落的程度以及恢复的速度来看，最严重的

故障点依次位于鹤岭、复兴和沙坪。

表2 故障后全省500 kV变电站平均电压对比

Table 2 Comparison of average voltages at 500 kV buses after the fault

	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
沙坪(湘东)	0.99	0.42	0.71	0.78	1.04

湘东电网是全省的负荷中心，其负荷占全省的40%，500 kV变电站座数占全省总量的30%。因此，位于湘东地区的鹤岭变电站500 kV近区发生三相故障后，全省500 kV母线平均电压跌落最为严重。仿真计算结果表明，位于湘西北地区的复兴变电站近区发生三相故障对全省的电压冲击仅次于湘东的鹤岭变电站。

(2) 机组功角摆动分析

湖南电网与华中主网的联网可以用图2的简单模型表示。图2中， E_s 为华中电网送端系统电势； E_r 为湖南电网受端系统电势； δ 为两个等值系统之间的功角差； X 为联络线等值电抗； S_r 为受端系统由送端获得的视在功率。

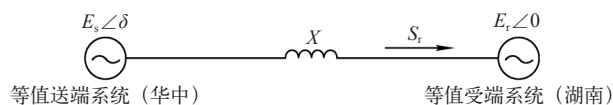


图2 简单模型

Fig.2 Simplified model

如果忽略线路的电阻及线路的有功损耗，送受端有功功率相等，表达式为

$$P_s = P_r = E_s E_r \sin \delta / X \quad (1)$$

送受端输电线路的无功功率的表达式如式(2)、式(3)所示，当线路两端功角差较小时，无功功率传输大小主要取决于电压的幅值。

$$Q_r = (E_s E_r \cos \delta - E_r^2) / X \quad (2)$$

$$Q_s = (E_s^2 - E_s E_r \cos \delta) / X \quad (3)$$

500 kV澧复双回线发生“N-2”后，虽然省

间的三回500 kV联络线均维持运行，但是500 kV澧州变电站与湖南省内其他站点的500 kV联系全部断开。湖南电网与湖北电网通过葛岗线、孱澧I线、孱澧II线以及澧州500 kV主变压器构成较弱的电气连接，等值电抗 X 增大很多。为维持输送有功功率 P_s 不变，功角差 δ 增大，湖南电网机群与华中电网机群功角摆开，形成“大功角差”。如果线路两端电压功角差较大，则即使两端电压幅值差值再大，也不可能通过该线路传输无功功率^[4]。

澧复N-2故障仿真曲线如图3所示。从电压曲线可见，故障后1.5 s电压恢复至0.8 (pu)以上，由于湖南电网机群与华中机群形成“大功角差”，故障后2 s左右电压又发生跌落。最终导致湖南电网对华中电网功角失稳，湖南电网电压失稳。

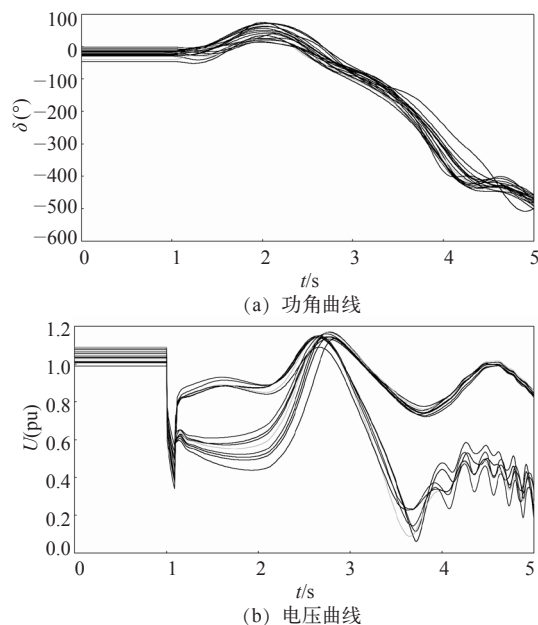


图3 澧复N-2仿真曲线

Fig.3 Simulation curve of N-2 of transmission line Lifu

采取澧复双回N-2后切除湖南电网部分负荷措施后，电压在故障后1 s内能够恢复至正常水平，湖南电网机群与华中电网机群之间的最大功角差在110°以内。

1.3 交流受电能力

综合以上约束条件，在切负荷安控系统投运的方式下，湖北电网与湖南电网三回交流联络线

最大受电能力为2 700 MW。

鄂湘交流受电能力与湖南电网负荷水平、切负荷量和开机方式均密切相关，如表3所示^[5]。

表3 鄂湘交流受电能力

Table 3 Power receiving capability of AC transmission line between Hunan and Hubei

(单位: MW)			
交流受电能力	湖南用电负荷要求	切负荷量要求	开机方式要求
1 600	—	—	—
1 900	≥10 500	≥500	—
2 200	≥13 500	≥650	湘东湘南开机不少于5台 华岳发电厂开机不少于2台
2 400	≥14 500	≥800	湘东湘南开机不少于6台 华岳发电厂开机不少于2台
2 700	≥17 000	≥900	湘东湘南开机不少于7台 华岳发电厂开机不少于2台

2 直流受电能力分析

± 800 kV 祁韶直流是我国首条大规模清洁能源特高压直流输电工程。输电距离约为2 413 km，设计输电能力为8 000 MW，是国家电网公司实施大范围优化资源配置，解决甘肃风电外送和湖南能源供应的重大举措。2017年祁韶特高压直流工程建成后，一定程度上缓解湖南省能源供应紧张的局面，为促进湖南省经济社会发展发挥了支撑和保障作用。

祁韶直流与跨区、跨省交流联络线均存在耦合关系，其送电功率还受到近区潮流疏散、湖南电网电压稳定等因素的约束。

2.1 跨区联络线耦合关系

特高压交流长南线和天中直流、祁韶直流共同构成华中跨区受电断面。其中联络华中—华北电网的单回特高压交流线长南线的静态稳定水平较低（约为6 000~6 700 MW）。根据电网直流闭锁、机组跳闸等多次事件后WAMS曲线记录，网内功率缺额导致长南线首摆转移比均大于90%^[6]。

祁韶直流双极闭锁，可能导致长南线运行功率超过静态稳定极限，导致华中电网与华北电网解列，解列后华中电网功率缺额较大，存在低频减载动作风险，需要采取控制长南线与祁韶直流送华中电网总功率的措施。

2.2 跨省联络线耦合关系

祁韶直流双极闭锁，全部功率将转移至三回500 kV鄂湘交流联络线，可能导致葛岗线功率超过其热稳定输送容量，需要采取控制鄂湘联络线与祁韶直流送湖南电网总功率的措施。

3.3 换流站近区潮流疏散能力

祁韶直流电力通过7回500 kV交流线分别输送至湘东、湘南电网（见图1）。500 kV星云线是韶山换流站近区潮流疏散的最薄弱环节。同杆并架的艾家冲—鹤岭双回线“N-2”或者古亭—星城双回线“N-2”均可能导致星云线超过其热稳定输送容量。

星云线潮流与祁韶直流运行功率、机组的开机方式以及湘南、湘中和湘西南等地区的负荷水平密切相关，其中云田500 kV并网机组湘潭4[#]机组对其潮流影响最大，湘潭4[#]机组52%的出力通过星云线送出。祁韶直流20%左右的有功功率通过星云线送星城。灵敏度较高的机组如表4所示。

调度运行中，需联合控制艾鹤双回线与星云

表4 机组相对灵敏度

Table 4 Sensitivity of generators

加重星云线		
名称	所属地区	灵敏度（%）
湘潭4 [#] 机组	湘东	52
攸县2 [#] 机组	湘南	15
宝庆2 [#] 机组	湘中	14
金竹山1 [#] 、2 [#] 机组	湘中	12
黔东1 [#] 、2 [#] 机组	湘西南	13
三板溪1 [#] ~4 [#] 机组	湘西南	13
加重星云线		
名称	所属地区	灵敏度（%）
长沙2 [#] 机组	湘东	18
黑麋峰1 [#] ~4 [#] 机组	湘东	18
华岳5 [#] 、6 [#] 机组	湘北	17

线潮流以及古星双回线与星云线潮流。按照湖南电网夏季典型大负荷方式，受星云线输送能力限制，祁韶直流最大输送功率约为4 000 MW。

2.4 湖南电压稳定约束

湖南电网负荷、电源分布不均，在祁韶直流投运之前，负荷中心已经存在较为复杂的电压稳定问题^[7]。祁韶直流投运恶化了系统电压调节性能，电压稳定问题更为突出。

(1) 电压稳定“敏感点”

湖南电压稳定的“敏感点”位于湘东的500 kV鹤岭变电站。仿真计算表明，500 kV鹤岭近区发生三相故障可能导致湘东电网部分变电站暂态电压失稳，严重情况下可能导致主网电压崩溃，湖南电网对华中主网解列，祁韶直流两极闭锁。前文中比较了几个典型变电站500 kV母线三相故障对电压的影响，结论是鹤岭变电站500 kV近区发生三相故障后，全省500 kV母线平均电压跌落最为严重。

(2) 电压稳定“薄弱点”

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%。采用电力系统分析综合程序（PSASP）计算的特高压直流受端电网静态电压稳定裕度结果如表5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5 特高压直流受端静态电压稳定裕度

Table 5 Static voltage stability margin of HVDC receiving end power grid

地区	静态电压稳定裕度 (正常方式) (%)	静态电压稳定裕度 (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

按照《国家电网安全稳定计算技术规范》要求，静态电压稳定计算中，在区域最大负荷或最大断面潮流下，正常运行或检修方式的区域负荷

有功功率裕度应大于8%；N-1故障后方式的区域负荷有功功率裕度应大于5%。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，内部电源装机容量维持不变，静态电压稳定裕度将随之下降。

电压稳定“敏感点”鹤岭变电站以及祁韶直流落点韶山换流站均位于湘东电网。仿真计算表明，鹤岭变电站500 kV出口三相故障后，湘东地区电压跌落严重，直流从交流系统吸收大量无功，进一步恶化了系统电压调节性能。负荷中的感应电动机“大滑差”特性导致湘东电网部分变电站暂态电压失稳，严重时将导致主网电压崩溃。

(3) 稳定控制措施

大扰动后的暂态过程中，电压下降，感应电动机负荷、直流逆变站吸收大量无功，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等无功电源提供。由于无功不能远距离输送，越靠近负荷中心的机组支撑效果越明显。

2018年韶山换流站两台300 Mvar调相机投运。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和暂态无功响应快等技术优势^[8]。

在调度运行中，需要根据湖南电网负荷水平、祁韶直流运行功率两个条件，确定湘东地区等负荷中心发电机和调相机的最小开机要求。受湘东电网发电机及调相机总台数的限制，祁韶直流最大输送功率约为5 000 MW。

3 交直流受电能力提升方案

湖南电网交直流受电能力与诸多因素存在复杂的关联关系。可以从配套二次系统的建设和一次系统的加强两个方面来提高受电能力。

3.1 安控措施

对于交直流混联电网，可以采取直流功率紧急控制措施。与传统切机、切负荷等安控措施

相比，直流功率紧急控制具有快速灵活、对系统造成经济损失小等优点，还可以将异步电网同步化，降低故障冲击，提高弱交流网架抵御能力。

目前，祁韶特高压直流安控系统及鄂湘交流联络线安控系统结构图如图4所示，其中祁韶直流安系统与鄂湘交流安控系统、特高压交流安系统

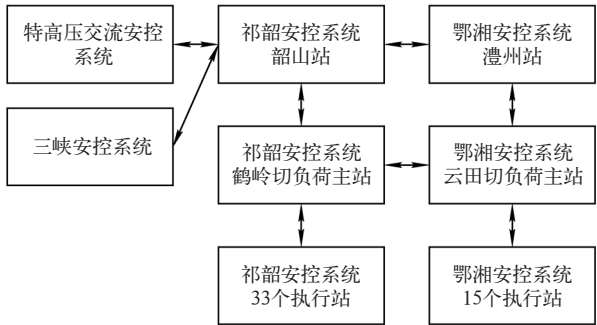


图4 安控系统结构图

Fig.3 Structure of security and stability control system

(1) 祁韶+长南总功率提升方案

如果祁韶直流与长南线同时满功率送华中电网，祁韶直流闭锁后，为保证长南线功率不超过其静稳极限，安控需切除湖南电网5 000 MW以上的负荷，切负荷量过大，无实施的可能性。

祁韶直流闭锁后，根据故障前长南线、祁韶直流运行功率以及长南线的静态稳定极限，计算维持电网稳定需要采取的总的稳定控制措施量，再根据实时上传的三峡送出直流的可调制量和湖南电网的可切负荷量，采取分层协调控制原则，按照切除湖南抽蓄电泵、调制三峡送出直流、切除湖南负荷的优先级序列采取措施，在保障电网安全的前提下尽量减少负荷损失。

采取祁韶直流闭锁后速降三峡送华东直流功率的措施，可以替代或者减小切负荷量，在降低电网运行风险的同时提升祁韶与长南送电总功率限额。华中电网简图如图5所示。

(2) 祁韶+鄂湘总功率提升方案

祁韶双极闭锁后湖南的有功功率缺额全部由鄂湘三回交流联络线承担。在现有网架结构下，只能采取切负荷措施。为避免切负荷量过大，构

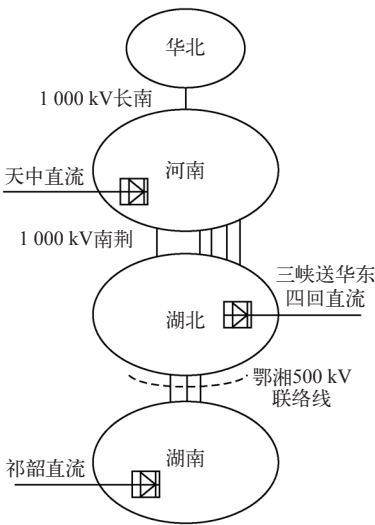


图5 华中电网简图

Fig.5 Sketch of central China power grid

成四级及以上电网事件，需要根据电网实际负荷水平滚动调整祁韶与鄂湘送湖南总功率限额^[9]。湖南电网总受电功率限额如图6所示。

表6 湖南电网总受电功率限额

Table 6 Power receiving limit of Hunan power grid

负荷水平/MW	安控切负荷量/MW	祁韶+鄂湘限额/MW
—	—	4 600
<22 000	500	5 100
≥22 000	1 000	5 600

从表6中可以看出，为满足切负荷量不超过湖南电网总负荷的5%，在现有网架结构下，根本无法满足祁韶直流8 000 MW满功率的送出需求。

(3) 近区潮流疏散解决方案

为避免同杆并架的艾鹤双回线“N-2”或者古星双回线“N-2”导致星云线过载，可以采取换流站近区交流线路“N-2”后速降直流等措施。根据故障前艾鹤双回线、古星双回线和星云线的运行功率，根据计算结果速降直流功率，保证星云线不过载。表7对比了艾鹤双回线“N-2”后采取安控速降直流300 MW与切除星城供电区负荷300 MW的效果，可见切除星城供电区负荷对星云线潮流影响很小，而速降直流功率的灵敏度接近40%。因此，不建议采取切负荷措施。

表7 直流调制与切负荷措施效果对比

Table 7 Comparison of HVDC modulation and load shedding

安控措施	星云线潮流变化/MW
速降直流300 MW	-119
切除负荷300 MW	-3

按祁韶直流可调制量800 MW进行计算, 祁韶直流输送能力可以提高1 000 MW左右。

3.2 交流特高压

在现有网架结构下, 考虑安控调制直流以及切负荷的措施, 湖南电网最大交直流总受电能力约为5 600 MW, 仍然无法满足负荷增长的需要。必须通过一次网架结构的加强来进一步提升受电能力。合理的电网结构是电力系统安全稳定运行的物质基础。面向强直弱交型混联电网, 需要协调直流与交流输电系统发展, 提升电网安全稳定水平, 增强交流承载冲击的能力^[10]。

(1) 电压稳定水平变化

湖南电压稳定的“敏感点”、“薄弱点”和祁韶特高压直流的落点均位于湘东电网。仅通过加强湖南省内部电网结构可以提高有效短路比, 但同时会导致大扰动后电压跌落更为严重。只有加强湖南电网与华中主网的联络, 才能有效地提高电压稳定水平。

华中1 000 kV特高压交流环网(荆门—武汉—南昌—长沙—荆门双回线)规划于“十三五”末期建成投运, 缩短了湖南电网与华中主网的电气距离, 湖南电网的电压稳定水平大幅提高。图6对比了特高压交流投运前后相同边界条件下鹤岭变电站近区三相故障后韶山500 kV母线电压的仿真曲线。由图6可以看出, 大扰动后电压的跌落时间缩短, 恢复速度提高, 暂态电压稳定水平提升明显。

(2) 直流闭锁后交流承载能力的影响

特高压交流入湘后, 祁韶直流发生双极闭锁等故障后的交流承接能力大大加强, 功率缺额大部分由四回省间1 000 kV特高压交流联络线承担。

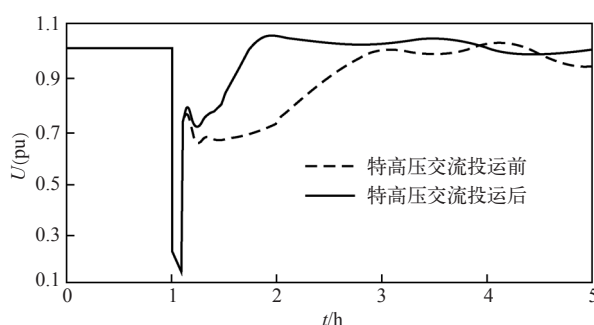


图6 特高压交流投运前后电压仿真曲线对比

Fig.6 Simulation curve before and after UHVAC transmission network in central China putting into operation

湖南电网的整体受电能力由5 600 MW提升至15 000 MW, 交直流整体受电能力大幅提升, 能够满足湖南电网负荷增长的需要。

4 结束语

湖南省一次能源缺乏, 大量电力需要由省外获得。随着负荷的不断增长, 电力缺口显现并逐步增大。湖南电网交直流受电能力与跨区联络线静态稳定极限、跨省联络线热稳定极限和湖南电网的暂态稳定问题等因素存在复杂的耦合关系。

1) 构建华中电网交直流协调控制系统, 利用多回直流紧急功率控制并配合切湖南电网负荷措施, 可以降低大容量直流对交流系统的故障冲击, 同时提高电网直流受电能力。但是, 在现有网架结构下, 仅依托交直流协控系统, 湖南电网交直流总受电能力提升有限。

2) 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, 提升故障后交流电网的承载能力。特高压交流入湘工程投运后, 湖南电网交直流受电能力将大幅提升。

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] 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院. 湖南电网2019~2020年过渡期安全校核报告[R]. 长沙: 国网湖南省电力公司电力科学研究院, 2018.
- [3] 国家电网安全稳定计算技术规范[S]: Q/GDW 1404—2015.
The standard on power system simulation[S]: Q/GDW 1404—2015.
- [4] 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.
- [5] 国家电网公司华中分部. 2018年华中主网稳定规定第一版[R]. 武汉: 国家电网公司华中分部, 2018.
- [6] 邵德军, 徐友平, 赵兵, 等. 交直流柔性协调控制在华中电网的应用[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1146-1151.
SHAO Dejun, XU Youping, ZHAO Bing, et al. Application of flexible coordinated AC/DC control technology in central-China power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1146-1151.
- [7] 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, HOU Yiling, et al. Study on transient voltage stability of Hunan power grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 196-202.
- [8] 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.
- [9] 国家电网公司. 国家电网公司安全事故调查规程[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [10] 郑超, 马世英, 申旭辉, 等. 强直弱交的定义、内涵与形式及其应对措施[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2491-2498.
ZHENG Chao, MA Shiyong, SHEN Xuhui, et al. Definition, connotation and form of strong HVDC and weak AC and countermeasures for stable operation of hybrid power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2491-2498.

作者简介



杨丹

杨丹(1982—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行与控制。

(收稿日期: 2018-05-10) **EA**