

海岛电网安全稳定性分析和对策研究

选取浙江舟山嵊泗为典型研究对象,通过建模分析,着重对其安全稳定性进行校核分析,并针对全接线运行方式提出相应的控制方案和优化措施,从而为海岛地区开展电网运行与维护提供参考。

李 懿 刘明康 卜 建 葛贤杰 王 栋/国网舟山供电公司



李 懿/工程师

嵊泗地处长江与钱塘江入海交汇口,杭州湾以东洋面上,浙江舟山群岛的最北部。嵊泗电网为典型的海岛弱端受电系统,原由2002年建成投产的芦嵊直流跨海输电系统负责供电。芦嵊直流跨海输电系统采取双极六脉动接线形式,直流海缆长度约为60 km,额定电压为 ± 50 kV,额定电流为600 A,双极额定功率为60 MW,从上海芦潮港换流站向浙江嵊泗换流站送电。

2011年6月,嵊泗电网在芦嵊直流跨海输电系统基础上,通过衢山至泗礁110 kV交流输电线路与舟山主网完成互联,使对外受电通道增加至两条。嵊泗电网与上海电网、舟山电网形成双电源通道交直流混联环式供电系统。

由于受到设备设计缺陷与海缆长度影响,芦嵊直流跨海输电系统的可靠性一直较弱,加上电网结构本身较弱,嵊泗电网曾多次出现由于直流系统故障和海缆线路遭外力破坏导致大量负荷损失的情况。交流联网后,情况虽然有所缓解,但是形势依旧严峻。近年来,海岛旅游开发加速引起用电需求快速攀升,泗礁、大洋山等地大型物流中转码头的冲击性负荷对电网影响较大,直流输电系统已近额定功率运行,交流海缆充电功率较大,电压调节困难,嵊泗电网安全稳定运行的压力与日俱增。

本文从电网结构和负荷特性两个方

面,对嵊泗电网全接线运行方式进行研究,分析系统故障对海岛电网安全稳定性的影响,进而提出相应的控制方案和优化措施。

嵊泗电网结构分析

嵊泗电网电压等级为35 kV,共有10个35 kV变电站,1个110 kV变电站和1个换流站。其中,换流站交流侧35 kV母线、110 kV泗礁变电站35 kV母线和35 kV基湖变电站形成三角形双环网。嵊泗与外界交直流联网落点均在此35 kV双环网上,系统提供的功率亦通过此双环网送往各变电站。除此双环网外,沈家、大洋、徐公和枸杞等5个变电站为末端站,与系统的联络线仅有一回,而马迹山、绿华和五龙等3个变电站,与系统有两回联络线。

除若干容量较小的柴油机组和汽轮机组作为紧急备用外,嵊泗电网内部无可持续稳定提供大容量出力的发电机组,其常用负荷均由外部系统供给。

从图1可以看出,若直流受电通道(即芦嵊直流跨海输电系统)发生单极闭锁或者双极闭锁,直流受电通道的潮流输送能力将大大下降,降低的潮流会转移到交流受电通道上,使得嵊泗电网不会出现大的功率缺额,也不用损失大量负荷来保持系统频率稳定,相对于交流联网之前,系统的供电可靠性和稳定性已取得较大提高。

若嵊泗电网与舟山主网的交流受电通道(衢山-泗礁110 kV线路)无故障或者故障跳开和110 kV泗礁变电站主变压器N-2故障后,嵊泗电网将变为孤岛,

关键词/Keywords

海岛电网·
安全稳定性·
交直流混联系统·
全接线运行方式·

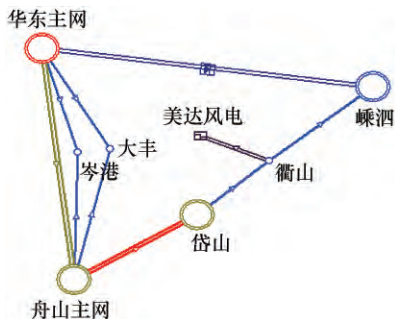


图1 嵊泗电网交直流受电通道示意图
其网架结构与交流联网前一致。考虑到交流联络线故障可能导致直流输电系统短时换相失败，负荷将随系统电压的跌落而变化，为保证由交直流混联转为孤岛后的频率和电压稳定，需对嵊泗电网系统现有控制预防措施进行分析。

嵊泗电网与舟山主网通过单回 110 kV 线路联网，即衢山 - 泗礁 110 kV 线路，而衢山变电站与舟山主网的联络线同样是单回 110 kV 线路，即岱山 - 衢山 110 kV 线路。若岱山 - 衢山线路无故障或者故障跳开，嵊泗电网转为孤岛运行，衢山变电站负荷接入嵊泗孤岛电网，在加剧嵊泗电网的功率缺额的同时，加重直流受电通道的输送压力，给嵊泗电网的安全稳定运行带来不利的影响。

220 kV 岱山变电站和 110 kV 衢山变电站隶属于岱山电网。除美达风电外，岱山电网没有任何电源接入。岱山电网与舟山主网的联络线为两回 220 kV 线路（即昌州 - 岱山、舟电 - 岱山输电线路）。此两回线路大部分为同塔架设，存在同时失去的可能。若两回 220 kV 线路同时故障跳开，嵊泗电网成为孤岛；若昌州 - 岱山、舟电 - 岱山两回线路一回检修，另外一回故障跳开，嵊泗电网同样转为孤岛，并且伴随整个岱山电网的负荷接入，嵊泗电网的功率缺额将大大加重，即便能够采取主动联跳或者低频切除衢山 - 泗礁 110 kV 线路的措施，但考虑到控制措施均存在一定的延时，大功率缺额下孤岛系统频率下降较快，对嵊泗电网的频率和电压稳定极为不利。

此外，在嵊泗电网交流并网点 110 kV 衢山变电站的 35 kV 母线侧，还接入有装机规模达到 40.8 万 MW 的美达风电场。当岱山 - 衢山 110 kV 线路 N-1 故障跳开，或者昌州 - 岱山、舟电 - 岱山的两回 220 kV 线路 N-2 故障跳开，嵊泗和岱

山部分地区形成孤岛，而美达风电场正处于此孤岛中。由于其现有的风机缺乏低电压穿越能力，所以交流受电通道故障时，将会影响到美达风电场的稳定运行，从而使得孤岛后嵊泗电网的频率稳定问题更加复杂。

嵊泗交流受电通道呈现本岛 - 岱山 - 衢山 - 泗礁的长链性结构，与舟山主网的交流联系仍然比较薄弱。此交流受电通道上的任何一个环节出现故障跳闸，都可能导致嵊泗电网转为孤岛运行，或者与岱山电网的部分变电站形成孤岛。若系统功率缺额比较大，再加上风电的间歇性和不确定性，即便直流频率调制和低周减载正确动作，嵊泗电网仍有可能失去稳定，或者系统频率和电压超过允许的范围，不利于系统的安全稳定运行。

负荷特性和模型说明

根据运行经验分析，设定嵊泗电网负荷水平为 56 MW，功率因数为 0.92，采用 BPA 程序进行负荷建模分析。静态负荷模型用来描述有功功率和无功功率稳态值与电压及频率的关系。BPA 程序提供了 LA 和 LB 两种类型的静态负荷模型，由此可得：

1) 舟山主网负荷选用类型 LA，即

$$P=P_0\left[P_1\left(\frac{V}{V_0}\right)^2+P_2\left(\frac{V}{V_0}\right)+P_3+P_4\left(1+\Delta fL_{DP}\right)\right]$$
 (1)

$$Q=Q_0\left[Q_1\left(\frac{V}{V_0}\right)^2+Q_2\left(\frac{V}{V_0}\right)+Q_3+Q_4\left(1+\Delta fL_{DQ}\right)\right]$$
 (2)

2) 嵊泗电网负荷选用类型 LB，即

$$P=P_0\left[P_1\left(\frac{V}{V_0}\right)^2+P_2\left(\frac{V}{V_0}\right)+P_3\right]\left(1+\Delta fL_{DP}\right)$$
 (3)

$$Q=Q_0\left[Q_1\left(\frac{V}{V_0}\right)^2+Q_2\left(\frac{V}{V_0}\right)+Q_3\right]\left(1+\Delta fL_{DQ}\right)$$
 (4)

以上负荷模型参数的各成分比例如表 1 所示。

表 1 静态负荷模型参数

地区	恒阻抗 负荷 比例		恒电流 负荷 比例		恒功率 负荷 比例		与频率 有关的 负荷比例		频率变化 1% 引起的负荷 变化百分数	
	P_1	Q_1	P_2	Q_2	P_3	Q_3	P_4	Q_4	L_{DP} (%)	L_{DQ} (%)
舟山主网					0.4	0.4	0.6	0.6	5.0	5.0
嵊泗电网	0.4	0.4			0.6	0.6			1.2	-2.0

全接线运行方式稳定分析

1. 运行方式一稳定分析

若通过直流通道受电 56 MW，接近其额定容量，承担电网总负荷的绝大多数，则交流通道受入的潮流比较小，仅为 4 MW。该运行方式如图 2 所示。

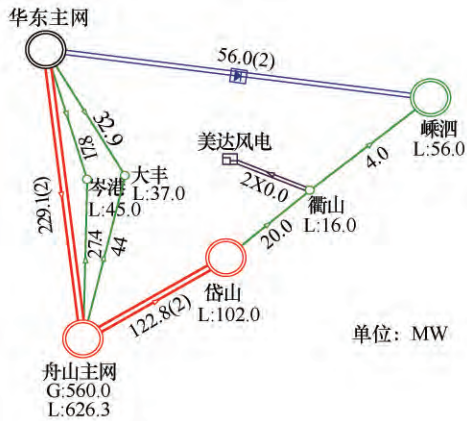


图2 嵊泗电网运行方式一

(1) 嵊泗电网故障后的系统动态特性分析

若衢山 - 泗礁 110 kV 线路发生 $N-1$ 故障，嵊泗电网交流母线电压波动曲线、直流功率波动曲线和嵊泗孤岛的频率波动曲线如图 3 ~ 图 6 所示。

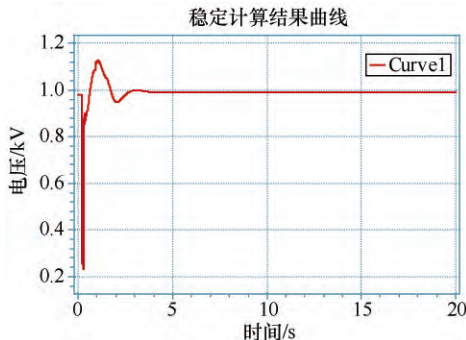


图3 衢山 - 泗礁线路 $N-1$ 的换流变逆变侧交流 35 kV 母线电压曲线

从图 6 可得，衢山 - 泗礁线路发生 $N-1$ 故障后，嵊泗由交直流混联变为孤岛。故障切除以后，交流系统的电压立即恢复到 0.9 (pu) 以上，负荷也随之恢复。直流功率逐渐恢复至起始值 28 MW 左右，由于直流功率恢复速度较负荷慢，故而孤岛系统频率随之下降。

在频率下降过程中，一旦达到低周减负荷装

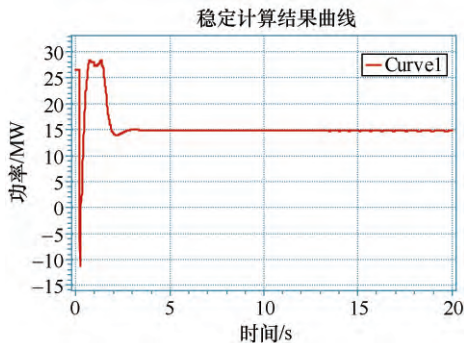


图4 衢山 - 泗礁线路 $N-1$ 的芦嵊直流功率波动曲线

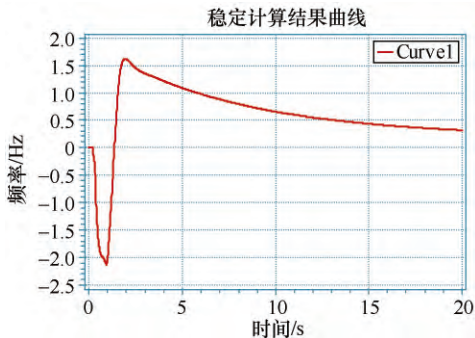


图5 衢山 - 泗礁线路 $N-1$ 的嵊泗电网频率曲线

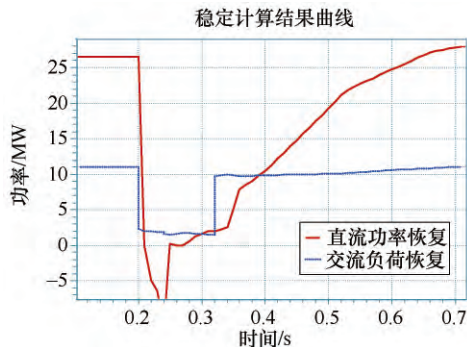


图6 衢山 - 泗礁线路 $N-1$ 的直流功率与交流负荷恢复对比曲线

置定值以及延时，低周动作切除 28 MW 负荷。由于此负荷超过嵊泗孤岛的事故前受电功率 4 MW，故而在直流功率恢复到起始值的动态过程中，系统出现功率过剩，系统频率超过 50.2 Hz，使得直流频率调制动作，直流功率降低至 15 MW 左右。系统频率在直流频率调制和低周切负荷装置的共同作用下，最终稳定在 50.3 Hz 左右。

(2) 嵊泗电网内部故障分析

若嵊泗电网内部 35 kV 线路发生三相永久接地故障和 $N-2$ 故障，线路保护正确动作及时切

除故障，除可能会损失末端变电站的部分负荷外，嵊泗电网能够保持稳定。故障切除后嵊泗电网系统电压能够恢复到正常水平，直流系统保持正常运行。

在嵊泗电网内部任何线路发生接地故障时，其短路电流主要由系统提供。由于系统提供的短路电流均经过嵊泗的交流受电通道送入嵊泗电网，故而导致从交流受电通道流经的电流会比较大，其功率波动也会比较大。

由图 7、图 8 可得，在故障期间衢山 - 泗礁线路的电流由 26 A 突增到 1 700 A 左右，有功功率由 4 MW 突增至 70 MW 左右，在故障切除后则很快衰减到其稳态潮流。

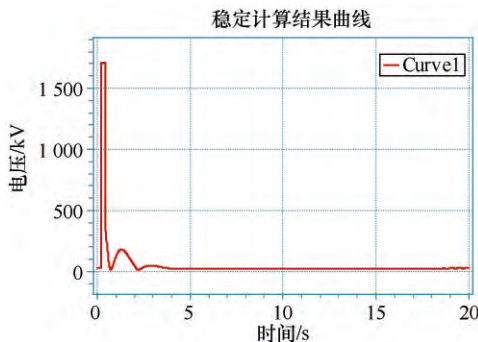


图 7 泗礁至基湖线路 N-1 故障后
衢山 - 泗礁线路电流曲线

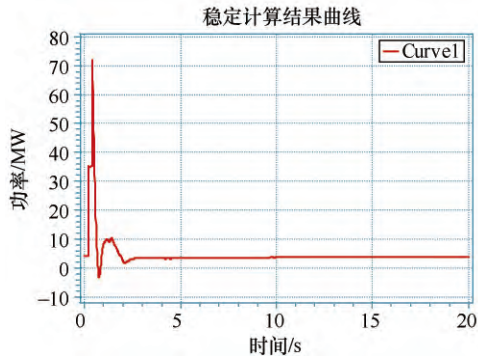


图 8 泗礁至基湖线路 N-1 故障后
衢山 - 泗礁线路功率曲线

(3) 直流受电通道故障分析

若直流输电系统发生单极闭锁或者双极闭锁，直流通道输送的大量功率将全部或者部分转移到交流通道上，嵊泗电网可以保持稳定运行，母线电压恢复到合理水平，不会发生电压失稳。

相对于孤岛方式下，单极闭锁需要切除大量负荷，双极闭锁全网失电的运行状况，直流系统

故障发生时，由于交流通道的作用，嵊泗电网可避免发生负荷损失。

(4) 交流受电通道故障分析

在岱山 - 衢山线路发生 $N - 1$ 故障后，衢山变电站仅与嵊泗电网相连，形成孤岛。若不采取联切衢山 - 泗礁线路，仅靠芦嵊直流的频率调制和衢山变电站、嵊泗电网的低周切负荷措施，系统频率可以恢复到正常水平，但是此时孤岛系统的最低频率已下降到 45.7 Hz，无法满足系统电气设备的正常用电需求。若在故障后采取联切衢山 - 泗礁线路，则系统最低频可以控制到 47 Hz 以上，基本满足系统正常运行的需要，但是此项措施将可能引起衢山变电站全站失电。

对于昌电、舟电至岱山双回 220 kV 线路的 $N - 2$ 故障，整个岱山电网和嵊泗电网将形成孤岛，其总负荷为 174 MW，该孤岛的功率缺额达到 122 MW，达到负荷的 70% 以上。

相对于交流通道的其他 $N - 1$ 故障，系统功率缺额比例较大，频率下降较快。若仅靠岱山和嵊泗电网的低周减负荷装置和直流频率调制功能，孤岛系统将发生频率崩溃。若采用远切嵊泗交流联络线的措施，则嵊泗电网形成孤岛系统，其事故前功率缺额较小，仅为 4 MW。在低周减负荷切除 33.6 MW 负荷后，嵊泗电网的频率逐渐由最低频率 47.3 Hz 恢复到 50 Hz 左右。频率曲线如图 9 所示。

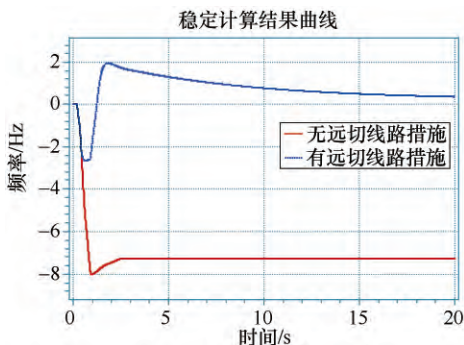


图 9 昌州、舟电至岱山的双回 220 kV 线路
发生 $N - 2$ 故障时有无远切措施的
嵊泗电网频率对比曲线

如表 2 所示，采取一定措施后，嵊泗孤岛的频率均能恢复到 50 Hz 左右。对于交流通道 3 种不同的故障，故障切除后会形成一个新的孤岛系

统（由嵊泗电网、衢山或者岱山组成），采取联切或者远切衢山－泗礁线路的措施后，又形成嵊泗孤岛（仅包括嵊泗电网的孤岛系统）。对于此 3 种故障形式，嵊泗孤岛的事故前总负荷、受电比

例均一致，但是由于故障地点不同，孤岛系统的故障前受电比例也随着故障地点的不同而有所差别，从而对于解列后嵊泗孤岛的频率特性和频率下降速度带来一定的影响。

表 2 运行方式一下不同孤岛方式的频率特性分析

孤岛组成	孤岛事故前受电情况			故障及措施		频率特性		
	总负荷 /MW	受电大小 /MW	受电比例 (%)	故障	措施	低周 /MW	最低频率及 时刻	频率下降速度 / (Hz/s)
嵊泗	56	4	7.1	衢山－泗礁 N-1		28	47.8 Hz/0.7 s	3.14
嵊泗、衢山	72	20	27.8	岱山－衢山 N-1	联切	33.6	47.3 Hz/0.5 s	5.4
嵊泗、衢山和 岱山	174	122	70.1	昌州、舟电 至岱山 N-2	远切	33.6	47.3 Hz/0.4 s	6.75

注：联切与远切，均是指主动解列衢山－泗礁 110 kV 联络线。

由表 2 可知，对于采取主动解列措施后的嵊泗孤岛电网，随着故障地点的不同，使得嵊泗全部与岱山部分形成孤岛。其事故前受电比例差别也不同，如衢山－泗礁线路 N-1 故障对应的比例为 7.1%，而昌州、舟电至岱山双回 220 kV 线路 N-2 故障的比例则达到 70.1%，二者相差近 10 倍。对于采取切除联络线措施后的嵊泗孤岛系统，由于系统故障地点的不同，其低周、频率下降速度均有所差别，对于受电比例为 7% 左右的故障 1，其低周切除 28 MW 负荷，频率下降速度为 3.14 Hz/s，而对于受电比例达到 70% 左右的故障 3，其低周切除 33.6 MW，频率下降速度也达到 6.75 Hz/s。

从 3 种故障的结果分析，事故前受电比例越高，在故障切除后系统最低频率越低，频率下降速度也越快，从而低周动作的轮次以及切负荷量也较多。因此，岱山电网的运行情况对于嵊泗电网的运行稳定性和供电可靠性存在比较大的影响。

2. 运行方式二稳定分析

若通过直流通道受电 8 MW，接近其最小容量，电网总负荷的绝大多数由交流通道提供，为 50 MW 左右。该运行方式说明如图 10 所示。

在方式二下，嵊泗电网发生内部 35 kV 线路 N-1 和 N-2 故障以及直流输电系统故障，系统仍能继续保持稳定。泗礁变电站主变压器 N-1 故障不需要采取措施，若主变压器发生 N-2 故

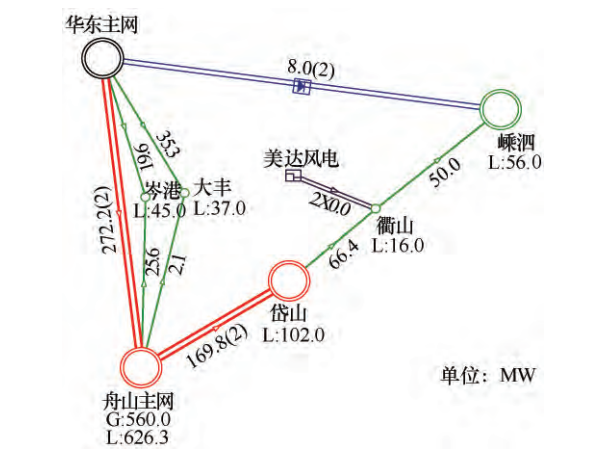


图 10 嵊泗电网运行方式二

障时，嵊泗将转为孤岛，并同时出现低周，需要切除负荷，频率才能恢复到正常水平。

嵊泗电网与舟山主网之间的交流联络通道发生故障时，同样需要通过低周动作切除负荷，联切衢山－泗礁线路，系统频率才能恢复至稳定运行的需求。昌州、舟电至岱山双回 220 kV 线路发生 N-2 故障时，扰动过程中系统的最低频率已到 47 Hz 以下。

如表 3 所示，在同等负荷条件下，直流系统的输送功率从接近满载 56 MW 变为最小功率 8 MW，交流受电通道的潮流将逐步增加。嵊泗电网的低周切负荷量随着交流通道受电的增加而增加，故障切除后频率最低点也越小，频率恢复也越慢，所以采用运行方式二不会出现过切现象。

由表 3 可知, 为保证昌州、舟电至岱山双回 220 kV 线路 $N-2$ 故障后频率的稳定, 系统已经切除全部低周负荷, 并且在采取联切线路措施的情况下系统最低频率达到 46.6 Hz 左右, 已无法

满足系统正常运行的需要。若负荷进一步增大, 而电网结构保持不变, 则交流受电通道的故障将会对嵊泗电网安全稳定运行极为不利, 电网存在频率失稳的风险。

表 3 运行方式二下不同孤岛方式的频率特性分析

孤岛组成	孤岛事故前受电情况			故障及措施		频率特性		
	总负荷 /MW	受电大小 /MW	受电比例 (%)	故障	措施	低周 /MW	最低频率及 时刻	频率下降速度 / (Hz/s)
嵊泗	56	50	89.3	衢山 - 泗礁 $N-1$		38.1	47.0 Hz/0.7 s	4.29
嵊泗、衢山	72	66	91.7	岱山 - 衢山 $N-1$	联切	38.1	46.9 Hz/0.45 s	6.89
嵊泗、衢山和 岱山	174	170	97.7	昌州、舟电 至岱山 $N-2$	远切	40.3	46.6 Hz/0.4 s	8.50

注: 联切与远切, 均是指主动解列衢山 - 泗礁 110 kV 联络线。

结束语

- 1) 在直流受电通道发生故障时, 大量功率将转移到交流输电线路, 嵊泗电网可保持稳定, 系统电压能在短时间内恢复正常水平, 不会发生电压失稳的问题。
- 2) 由于交流受电通道穿越岱山地区, 当该通道发生故障导致系统孤岛时, 在不采取或采取联切联络线措施前, 则可能使岱山的部分变电站与嵊泗电网一起构成孤岛系统, 因此岱山电网的运行方式将对嵊泗电网的安全稳定起到重要影响。
- 3) 当交流受电通道发生故障导致系统孤岛时, 均需要低周切除一定比例的负荷, 并配合直流频率调制功能和联切衢山 - 泗礁 110 kV 联络线等措施, 才能保持孤岛系统的频率稳定。
- (4) 与方式一相比, 方式二的安全稳定性较差, 因此, 推荐方式一作为正常运行方式, 即尽量采用由直流多送, 交流少送的模式。

参考文献

[1] 徐政, 徐琼璟, 任雷. BPA 与 PSASP 及 PSS/E 机电暂态仿真的负荷模型比较 [J]. 南方电网技术, 2008, 2 (5): 32-34.

[2] 周浩, 沈扬, 李敏, 等. 舟山多端柔性直流输电工程换流站绝缘配合 [J]. 电网技术, 2013, 37 (4): 880-889.

[3] 李敏, 顾益磊, 宋春燕, 等. 含柔性直流输电系统的舟山海岛电网安全稳定分析 [J]. 华东电力, 2014, 42 (1): 87-91.

[4] 郑超, 盛灿辉, 林俊杰, 等. 特高压直流输电系统动态响应受端交流电网故障恢复特性的影响 [J]. 高电压技术, 2013, 39 (3): 556-559.

[5] 贾萌萌, 丁剑, 张建成, 等. 弱受端小电网安控切负荷措施与低频减载措施的配合方案 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38 (1): 75-79.

[6] 李懿, 马振会. 浅谈柔性直流技术在海岛输电中的推广应用 [J]. 浙江电力, 2011, 30 (7): 26-29.

[7] 吴一峰, 吴国忠. 220 kV 交流联网线投运后舟山电网安全稳定控制系统研究 [J]. 机电工程, 2010, 27 (11): 120-121.

(收稿日期: 2014-05-21) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告