特高压接入福建电网后省际断面电磁环网特性研究

随着浙福特高压工程的投运，在提升福建电网安全稳定水平和送出能力的同时，在省际断面形成的多级电磁环网也将带来不可估量的影响。针对浙福特高压工程、淮南－沪西全环特高压工程投运后的华东电网2016年高峰负荷方式，采用PSD－BPA程序对福建－浙江断面电磁环网进行电网特性和安全稳定分析，考虑不同故障约束对福建电网外送能力进行评估，基于分析结果对特高压接入福建电网初期安全稳定运行提出相应的应对措施，并验证了所提措施的合理性和先进性。

冯祎鑫／国网福建省电力有限公司厦门供电公司

冯祎鑫／助理工程师

关键词／Keywords

电磁环网·

特高压·

安全稳定分析·

福建电网·

0 引言

电力系统的电磁环网是指不同电压等级的输电线路通过变压器或电磁耦合构成的环形电网。我国特高压建设已进入蓬勃发展时期，浙北－浙中－浙南－福州特高压交流输电工程（以下简称“浙福特高压工程”）投运将有利于提高华东电网安全稳定水平，满足福建电网丰期盈余电力外送需求[1-3]。然而高电压等级网架建设过程中难免在省际断面出现若干多级电磁环网，考虑到供电可靠性、输电能力等因素，不具备解环条件的电磁环网将对系统安全稳定运行带来一定风险[4-5]。特高压接入福建电网后省际断面存在1 000 kV、500 kV与220 kV的多级电磁环网，电网安全稳定存在较大风险，电网运行控制难度较大，为充分发挥工程的输电能力和效益，提高福建电网的安全稳定水平，需要对包含特高压在内的多级电磁环网的运行特性及输电能力进行深入研究。

基于浙福特高压工程、淮南－沪西全环特高压工程投运后的华东电网2016年高峰负荷方式，本文采用中国电力科学研究院的PSD－BPA程序对福建电网省际断面的多级电磁环网进行安全稳定分析，评估省际断面的输电能力及其特性，对特高压接入福建电网初期安全稳定运行提出相应的应对措施，以期全面提升福建电网的安全稳定水平和综合防御能力，为“三华”特高压同步电网过渡期电网的安全稳定运行提供技术支持。

1 电网特性

1.1 潮流分析

如图1所示，福建－浙江断面由1 000 kV福州－浙南双回线以及500 kV宁德－浙西双回线组成。从潮流分布和流向来看，福建－浙江断面区域电网潮流的基本趋势是呈现“闽电北送”的格局。

从潮流分析可得，1 000 kV和500 kV主变压器穿越功率在变压器额定功率范围内，无过载现象发生，特高压工程投运后潮流分布较为合理，线路负载基本上处于经济运行范围内。

1.2 静态$N-1$开断

运行方式下的电力系统任一元件（如线路、变压器等）无故障或因故障断开，电力系统应能保持稳定运行和正常供电，其他元件不过负荷，电压和频率均在允许范围内，对福建－浙江断面

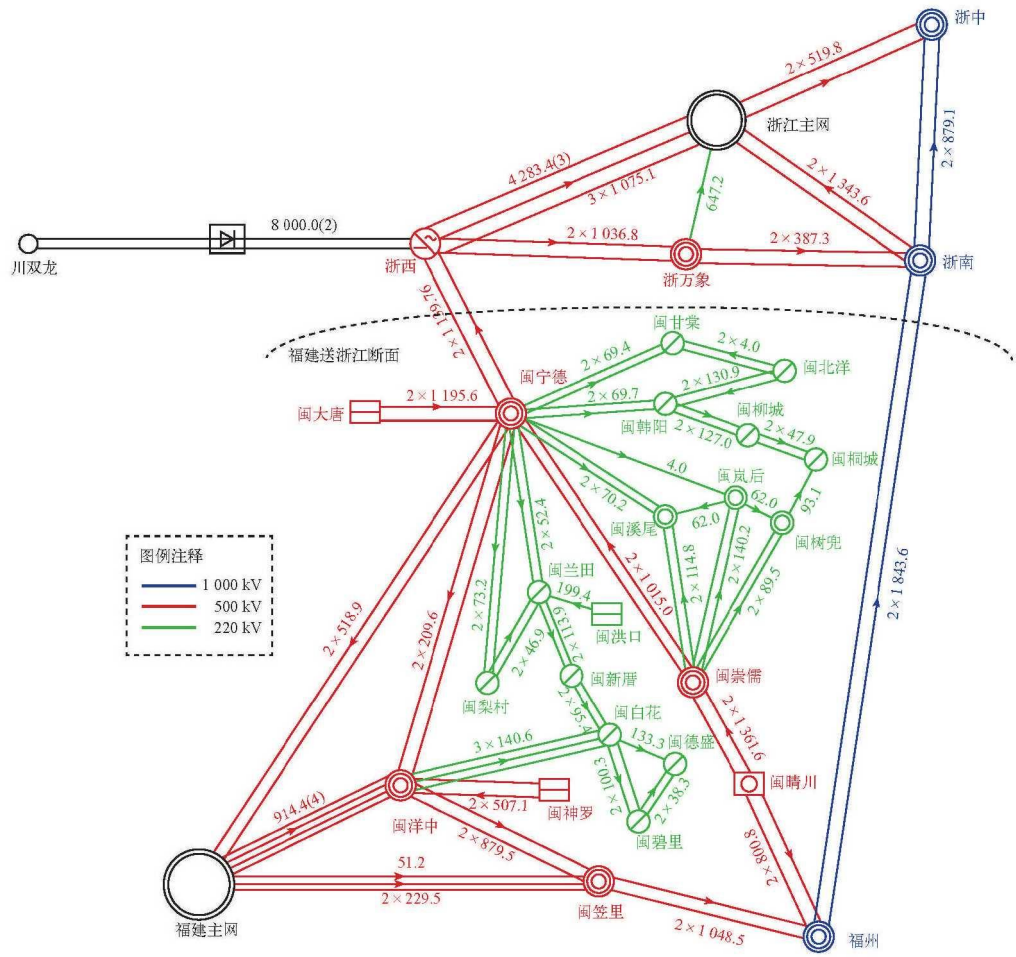

图1　福建－浙江断面电磁环网

电磁环网进行$N-1$开断计算分析，可得如下结论。

1）由于1 000 kV福州变电站上网功率达到3 690 MW，福州变电站两台主变压器容量均为3 000 MV·A，福州变电站一台主变压器静态$N-1$开断将导致另外一台主变压器过载达到12.7%，考虑特高压主变压器1.3倍的过载能力，此情况可以接受，或可通过控制近区电站发电量予以消除。1 000 kV浙南变电站下网功率仅为1 930 MW，主变压器静态$N-1$开断不会引起另外一台主变压器过载。

2）由于接入220 kV电网层面机组的出力与用电负荷大体相当，不存在大量的功率盈余或不足问题，使得福建－浙江断面电磁环网总体上500 kV变电站主变压器的穿越功率较小，主变压器静态$N-1$开断不会引起其他元件过载。

3）一些接入500 kV电网的发电厂在机组满发情况下，当送出线路发生静态$N-1$开断，存在剩余线路的电流超过额定电流的情况，如大唐发电厂等，可通过降低机组出力予以消除。

4）由于大部分500 kV线路额定电流较大，达到4 232 A，500 kV主干网线路静态$N-1$开断不会引起其他元件过载，宁德－浙西双回线额定电流较小，但由于可将外送功率转移至1 000 kV福州－浙南双回线上，因此也不会出现过载现象。具体情况如表1所示。

表1　福建－浙江断面电磁环网静态$N-1$开断过载情况

过载元件（额定容量）	过载量(%)（元件实际值）	$N-1$开断元件	消除过载的措施
1 000 kV福州2#主变压器（3 000 MV·A）	12.7（3 382 MV·A）	1 000 kV福州1#主变压器	减小晴川发电厂出力
大唐－宁德II回线路（2 335 A）	13.8（2 657 A）	大唐－宁德I回线路	减小大唐发电厂出力

2 安全稳定分析

2.1 输电能力评估

采用静稳实用算法，增加福建机组出力的同时降低浙江机组出力，可得到福建－浙江断面静态稳定极限为11 110 MW，如图2所示。

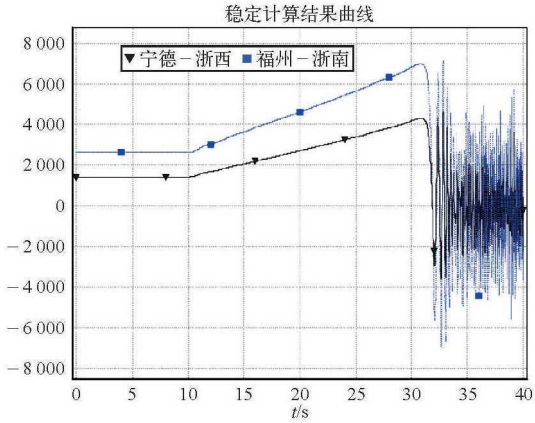

图2 福建－浙江断面静态稳定极限

根据上述计算结果，浙福特高压工程投运后福建－浙江断面静态稳定极限约为11 000 MW，大大超过该断面外送需求，断面静稳裕度很大。

不同故障约束下，福建－浙江断面输电能力如表2所示。由表2可见，福建电网外送能力主要受到的约束是特高压福州主变压器$N-1$之后另一台主变压器过1.3倍热稳限额，福建－浙江断面输电能力约为6 000 MW。图3为500 kV宁德－浙西宁德侧$N-1$故障后福建对主网功角曲线。图4为特高压福州变电站主变压器三永$N-1$故障后剩余一台主变压器的功率曲线（1.3倍过载）。

2.2 暂态稳定分析

针对严重故障，研究1 000 kV、500 kV层面严重故障扰动对系统的冲击，主要考虑两种故障形式：①线路三永短路跳双回线路故障，即双回线一回三永故障另一回保护误动导致两回全部跳闸

表2 福建－浙江断面极限潮流表

（单位：MW）

线路潮流	宁德－浙西双线	特高压福州－浙南双线	福建送出	计算结果图示
宁德－浙西宁德侧$N-1$故障福建对主网动态失稳约束	2 712	4 976	>6 000	图3
福建对主网小干扰稳定约束潮流	2 712	4 976	>6 000	图4
福州主变压器$N-1$故障另一台主变压器1.3倍过载	1 993	3 910	5 961	图5

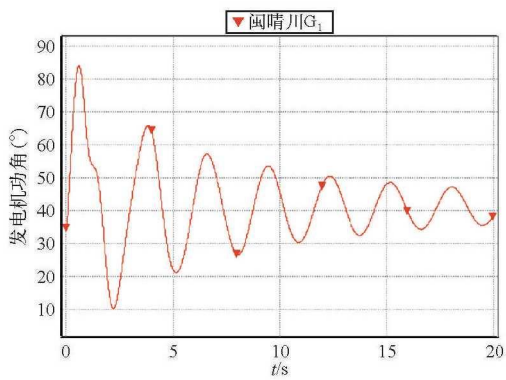

图3 500 kV宁德－浙西宁德侧$N-1$故障后福建对主网功角曲线

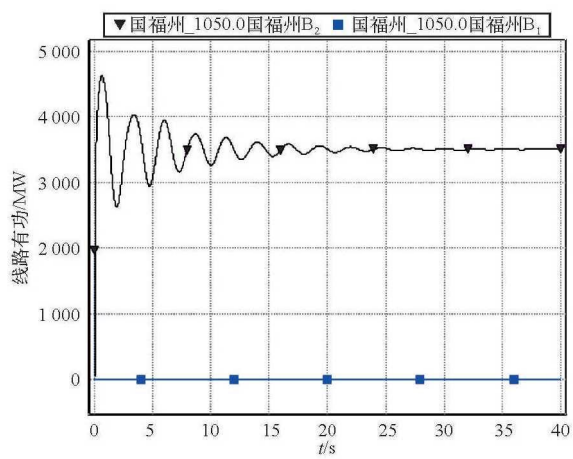

图4 特高压福州变电站主变压器三永$N-1$故障后剩余一台主变压器的功率曲线（1.3倍过载）

（不考虑发电机出线只有两回线的故障情况）；②主变压器三永短路跳站内两台主变压器故障，即站内一台主变压器三永故障，另一台主变保护误动导致两台主变压器全部跳闸。

在高峰方式下，对福建－浙江断面电磁环网中1 000 kV、500 kV线路分别进行三永短路故障跳双回线路和1 000 kV、500 kV双主变压器变电站发生主变压器三永短路跳两台的故障计算，结果表明系统存在如下问题。

1）福州－浙南特高压三永短路跳双回故障，会导致宁德－浙西两回500 kV线路严重过载，同

时伴随暂态稳定问题，存在连锁跳闸的风险。

2）500 kV晴川－崇儒双回线三永短路跳双回故障，会导致晴川发电厂机组发生功角失稳现象，通过切除晴川发电厂一台机组（1 150 MW），系统可保持安全稳定。

3）洋中主变压器三永短路跳两台故障，故障后220 kV兰田－新厝功率由114 MW增至235 MW，超热稳限额（232 MW）。可采取的稳控措施：切闽洪口一台机组（100 MW），兰田－新厝功率可控制在热稳限额以下，有效降至188 MW。

3　应对措施

3.1　安控连锁跳闸系统

针对2.2节分析结果中福州－浙南特高压三永短路跳双回故障问题，最为有效的措施是配置相应的安控连锁跳闸系统。基于经济运行和安全运行的权衡，不同情况下安控措施如表3所示。

表3　不同断面预控潮流下安控措施配置情况

断面预控潮流/MW	安控措施
5 970	切大唐发电厂两台机组、可门发电厂一台机组，共1 800 MW
5 520	切大唐发电厂两台机，共1 200 MW
4 660	无须安控措施，但$N-2$并断后宁德－浙西双回线将过载
3 900	无须安控措施，需合理安排运行方式

考虑到特高压线路安全可靠性较高，福建电网丰期盈余电力外送需求更为重要，断面预控潮流为5 970 MW时，采取安控措施在故障后对相应机组进行切除，系统响应曲线如图5所示。

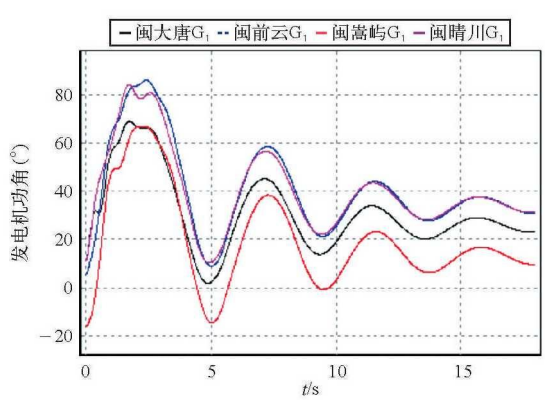

图5　故障后机组功角响应曲线

3.2　电磁环网解环运行

根据短路电流分析，可得220 kV宁德变电站短路电流水平为49.7 kA，极为接近其断路器遮断容量（50 kA），通过分析，鉴于220 kV宁德－岚后单回线、220 kV溪尾－岚后单回线和220 kV树兜－岚后单回线潮流较轻，可考虑以下三种网架调整建议：①将宁德－岚后单回线解开；②同时将宁德－岚后单回线、溪尾－岚后单回线和树兜－岚后单回线解开；③解开220 kV新厝－兰田双线。解环后短路电流情况如表4所示。

表4　解环前后宁德变电站短路电流水平

状态	短路电流/kA
未解环前	49.7
宁德－岚后单回线解开	48.7
同时将宁德－岚后单回线、溪尾－岚后单回线、树兜－岚后单回线解开	48.3
解开新厝－兰田双线	43.5

由表4可以看出，解开220 kV新厝－兰田双线对降低宁德站短路电流水平效果显著，因此可解开220 kV新厝－兰田双线，宁德－福州电网完全解环运行。

4　结束语

针对浙福特高压工程、淮南－沪西全环特高压工程投运后的福建电网省际断面电磁环网特性进行深入研究，得到如下结论。

1）通过潮流分析与静态$N-1$开断对福建－浙江断面电网进行特性研究。分析结果表明，浙福特高压工程的投运有效地改善了福建电网的潮流分布水平。

2）基于不同故障约束下输电能力的评估，浙福特高压工程投运后福建电网外送能力主要受到的约束是特高压福州主变压器$N-1$之后另一台主变压器过1.3倍热稳限额，断面输电能力约为6 000 MW。

3）考虑极端条件下对福建－浙江断面电磁环网进行暂态稳定分析，针对福州－浙南特高压双线$N-2$故障问题，建议配置浙福特高压工程安控连锁跳闸系统，切除福建电网内相关机组；

(下转第35页)

网的影响研究综述 [J]. 电力自动化设备，2013，33 (2)：26-32.

[2] 王峰，王春宁. 分布式电源接入系统方案典型设计研究及应用 [J]. 电气应用，2015，34 (21)：116-119.

[3] 苏小玲，韩民晓，赵正奎，等. 配电网中分布式电源最大准入容量分析 [J]. 电网技术，2012，36 (10)：87-92.

[4] 赵波，张雪松，洪博文. 大量分布式光伏电源接入智能配电网的能量渗透率研究 [J]. 电力自动化设备，2012，32 (8)：95-100.

[5] 范明天，张祖平，苏傲雪，等. 主动配电系统可行技术的研究 [J]. 中国电机工程学报，2013，33 (22)：12-17.

[6] 尤毅，刘东，于文鹏，等. 主动配电网技术及其进展 [J]. 电力系统自动化，2012，32 (18)：10-16.

[7] 安树怀，王明渝，邓威，等. 可用于光伏并网的双频逆变器控制策略 [J]. 电力自动化设备，2011，31 (1)：84-88.

[8] 李勋，龚庆武，胡元潮，等. 智能配电网体系探讨 [J]. 电力自动化设备，2011，31 (8)：108-111.

[9] Conti S，Raiti S，Tina G，et al. Study of the impact of PV generation on voltage profile in LV distribution networks [C]. 2001 IEEE Porto Power Technology Conference，Porto，Portugal：IEEE，2001.

[10] 康海云，杭乃善，卢桥，等. 分布式光伏发电在智能电网中的作用分析 [J]. 电网与清洁能源，2013，29 (10)：86-90.

[11] 刘伟，彭冬，卜广全，等. 光伏发电接入智能配电网后的系统问题综述 [J]. 电网技术，2009，33 (19)：1-6.

[12] 许晓艳，黄越辉，刘纯，等. 分布式光伏发电对配电网电压的影响及电压越限的解决方案 [J]. 电网技术，2010，34 (10)：140-146.

[13] 韩菲，李强，李道宽，等. 考虑潮流分布的分布式电源最佳接入容量计算 [J]. 电气应用，2014，33 (21)：34-37.

[14] 丁明，王伟胜，王秀丽，等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述 [J]. 中国电机工程学报，2014，34 (1)：1-14.

[15] 曾令诚，吕林，曾澜钰. 基于sollin 算法的含分布式电源的孤岛划分方法 [J]. 电力自动化设备，2013，33 (4)：95-100.

（收稿日期：2017－08－30）EA

(上接第27页)

而基于短路电流分析可将宁德－福州电网完全解环运行，有效降低其短路电流水平。

参考文献

[1] 刘振亚. 特高压交直流电网 [M]. 北京：机械工业出版社，2004.

[2] 任大伟，易俊，韩彬，等. 浙北－福州特高压交流输电工程系统调试中电网运行方式的调整 [J]. 电网技术，2014，38 (12)：3354-3359.

[3] 汤奕，陈斌，皮景创，等. 特高压直流分层接入方式下受端交流系统接纳能力分析 [J]. 中国电机工程学报，2016，36 (7)：1790-1800.

[4] 刘明松，张健，张文朝，等. 弱电磁环网运行控制若干问题及对策 [J]. 电力系统自动化，2014，38 (4)：109-114.

[5] 田蓓，赵二岗，顾雨嘉，等. 电磁环网解环暂态稳定和电压稳定量化评估 [J]. 电气应用，2015，34 (增刊2)：492-498.

（收稿日期：2016－12－22）EA