

DOI: 10.7667/PSPC180171

背靠背柔性直流接入电网后的影响评估

李大虎^{1,3}, 张志杰², 张伟晨², 姚伟², 孙建波¹, 李冬梅⁴, 文劲宇²

(1. 国网湖北省电力公司, 湖北 武汉 430077; 2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学电气与电子工程学院), 湖北 武汉 430074; 3. 湖北工业大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068; 4. 中国电建集团河南省电力勘测设计院有限公司, 河南 郑州 450007)

摘要: 考虑到目前对大容量背靠背柔性直流接入电网的影响评估尚缺少具有全面性且通用性的方法, 提出一种适用于分析背靠背柔性直流接入对电网影响的评估方法。该方法主要包含静态安全性、短路电流水平、小干扰稳定性和暂态稳定性分析, 重点关注柔性直流与交流系统相互影响。以渝鄂背靠背柔性直流工程为案例, 采用电力系统分析综合程序(PSASP)对背靠背柔性直流接入湖北电网前后的运行特性进行评估。根据评估结果, 结合电网规划与运行要求, 提出相应的电网补强工程与安控措施。仿真研究表明, 所提评估方法能有效指导电网规划与调度控制, 保证电力系统安全稳定运行。

关键词: 背靠背柔性直流; 异步联网; 暂态稳定性; 交直流电网

Influence evaluation of provincial power grid integrated with back-to-back VSC-HVDC

LI Dahu^{1,3}, ZHANG Zhijie², ZHANG Weichen², YAO Wei², SUN Jianbo¹, LI Dongmei⁴, WEN Jinyu²

(1. State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 4. Henan Electric Power Reconnaissance Design Institute, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: Considering that there is a lack of a comprehensive and universal method for assessing the influence of provincial power grid with large-capacity back-to-back VSC-HVDC connection, an influence assessment method is proposed in this paper. Several aspects such as analysis of static security, short circuit current level, small signal stability and transient stability are included in the method. Interaction between VSC-HVDC and AC system is emphatically considered. Taking back to back VSC-HVDC connecting Chongqing and Hubei power grid as an example, the operation characteristics of Hubei power grid are assessed with Power System Analysis Software Package (PSASP). According to assessment results, the corresponding reinforcing project and security control measures are proposed with the consideration of power grid planning and operation requirements. The analysis shows that the influence assessment method proposed in this paper can effectively guide the planning and dispatch control of power grid and ensure the safe and stable operation of the power system.

This work is supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2014CB247400) and National Natural Science Foundation of China (No. 51577075).

Key words: back-to-back VSC-HVDC; asynchronous interconnection; transient stability; AC/DC hybrid power grid

0 引言

采用电压源型换流器技术的柔性直流输电(VSC-

HVDC)具有无换相失败、有功与无功功率解耦且灵活可调等优点, 已成为构建智能电网的关键技术之一^[1-2]。背靠背柔性直流输电技术能够实现两个交流电网的异步互联, 在隔离交流系统故障的同时提高电网的可控性。但由于背靠背柔直传输的有功功率为定值, 两侧交流电网的等效转动惯量下降, 有可能

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目资助(973 计划)(2014CB247400); 国家自然科学基金项目资助(51577075)

降低电网的暂态安全性^[3]。评估背靠背柔性直流对电网运行特性的影响，并针对网架薄弱环节进行配套补强，保证电网安全稳定具有重要意义。

针对柔性直流接入对交直流混联电网的影响已有许多研究。文献[4-5]对含有柔性直流输电的交直流系统的有功和无功潮流优化进行研究；文献[6-7]研究含柔直的交直流电网在不同系统扰动下的暂态稳定特性；文献[8-10]研究优化背靠背柔性直流输电系统的控制策略以提升系统稳定运行能力；文献[11-12]对含柔性直流的交直流系统的充裕性、经济性指标进行研究。现有的研究大多针对潮流特性、系统稳定与控制等不同角度分析柔性直流接入对电网的影响，缺少用于电网影响评估的一般性方法。

本文提出一种适用于大容量背靠背柔性直流接入省级电网的影响评估方法，评估内容包括静态安全性、短路电流水平、小干扰稳定性和暂态稳定性，其中暂态稳定性评估在交流系统典型故障分析的基础上需要关注交流系统与背靠背柔直输电系统的交互影响下的系统稳定性。以渝鄂背靠背柔性直流工程为案例，评估湖北电网运行特性并基于评估结果提出电网补强方案与控制措施。案例分析结果表明，所提的柔直接入电网影响评估方法能有效指导电网规划与调度控制，保障电力系统安全稳定运行。

1 背靠背柔性直流接入后的影响评估方法

背靠背柔直系统接入电网后，网架结构的变化、柔直故障闭锁等因素均会影响系统安全稳定运行，本文建立一套包含静态安全性、短路电流水平、小干扰稳定性和暂态稳定性四方面的背靠背柔直接入电网的影响评估方法，评估模型如图 1 所示。

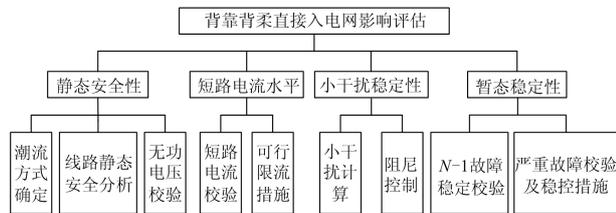


图 1 背靠背柔直接入电网的影响评估模型

Fig. 1 Influence assessment method of back-to-back VSC-HVDC connection into power grid

1.1 静态安全性

参照相应规定，静态安全性评估应包含典型潮流方式确定、线路静态安全分析、无功电压校验三项内容^[13]。

1.1.1 典型潮流方式确定

电网不断发展导致系统潮流方式变化，需基于

电网结构、新增规划电源、省间断面输电能力等因素重新制定合理潮流运行方式。潮流方式通常有丰大、丰小、枯大、枯小四种，基本能够包含电力系统各类元件的不同运行极限，背靠背柔直接入电网后的安全稳定风险能得以较充分地暴露。

1.1.2 线路静态安全分析

柔直工程落点地区需疏散柔直馈入功率，对相关地区输电能力提出了更高要求^[14]。为保证电网足够的静态稳定储备，线路功率在正常运行方式下要满足静态安全稳定规定的限额。此外，实际电网中任一元件因检修退出运行或者发生单一故障的情况十分常见，线路功率不能超过其 $N-1$ 功率控制限额。若柔直落点近区潮流超过静态功率控制限额难以控制，需考虑线路扩容或新建补强线路。

1.1.3 无功电压校验

省级电网枢纽变电站电压在不同运行方式下具有一定控制范围约束，无功电压水平不合理情况下需调节相应无功补偿设备。无功补偿设备备用不足，可考虑进行无功设备扩容。

1.2 短路电流水平

背靠背柔直接入电网后，不会带来送端电网电源提供的短路电流，对短路电流限制有利。但为解决柔直投产后省网潮流疏散及可能存在的暂稳问题而配套投产的补强工程使地区电网电气距离减小，短路电流有所上升。若短路电流越限则需采取限流措施，通常有：电磁解环分层分区运行^[15]、母线分段运行^[16]、采用串联电抗器^[17]等，必要时可更换更高遮断容量断路器。

提升电力系统安全性与降低短路电流水平相互制约，实际网架补强工程和限流措施的制定需反复迭代计算校验。

1.3 小干扰稳定性

柔直接入省级电网改变了大区联网方式，电网小干扰稳定特性尤其是区域间振荡模式会发生较大变化^[18]。因此，需重新进行小干扰计算分析系统小干扰稳定性，若出现弱阻尼或负阻尼模式，则需要添加相应阻尼控制措施，如合理配置电力系统稳定器(PSS)。

1.4 暂态稳定性

暂态稳定性指电网受到大扰动后系统维持稳定的能力。暂态稳定要求受扰后机组功角衰减振荡、系统电压逐步恢复且暂态过程中频率保持 50 Hz 附近。故障扰动暂稳计算是发现电网薄弱环节，校核控制保护系统是否满足电网稳定运行要求的主要环节。

1.4.1 N-1 故障校核

$N-1$ 故障包括：交流线路三永 $N-1$ 故障；交

直流混联电网中直流线路单极故障闭锁。单一元件故障后, 电力系统仅在第一道防线正确动作下即能保持稳定。500 kV 网架要求 $N-1$ 故障校验能够全部通过。若大容量柔直接入后 500 kV 网架存在 $N-1$ 校验不通过线路, 需重新调整潮流; 若潮流调整不易实现可考虑添加补强线路。

1.4.2 严重故障校验及稳控措施

严重故障包括: 交流线路三永 $N-1$ 故障(同杆并架双回线的一回发生三相短路接地故障重合不成功, 双回线三相同时跳开); 交直流混联电网中直流线路的双极故障闭锁; 特定方式下的孤网运行。

对 500 kV 网架 $N-1$ 严重故障, 首先考察仅在第一道防线下系统是否依然能够稳定。若不能, 再校验第二道防线的措施量是否满足稳定控制要求。若仍不能则需结合网架变化提出新的稳控措施或相应网架补强方案。

某些网架结构在特定故障下存在局部电网与主网解列的极端运行工况^[19-20], 即孤网运行。例如: 地区电网与主网仅通过三回 500 kV 交流线连接, 该三回线中若一回检修、剩余两回发生故障同时跳时, 将形成孤网运行方式。孤网内部将产生功率不平衡量, 导致孤网频率波动甚至崩溃, 解决孤网频率问题的紧急措施通常为高频切机和低频减载^[21]。严重故障校验应包含孤网运行的风险评估。

背靠背柔性直流接入电网后, 交流系统与柔直存在交互影响。具体表现为: 一方面, 交流系统故障扰动会引起柔性直流系统内部状态变量变化, 尤其是在某些严重故障扰动下, 柔直控制保护系统检测的状态变量若超越保护整定值而触发柔直保护动作, 换流器闭锁, 继而将造成系统两端功率不平衡; 另一方面, 柔直发生闭锁后将会造成整个交直流混联系统中产生比单纯的交流典型故障更大功率不平衡量, 加剧送受端电网的功率振荡, 进而影响电网暂态稳定性^[8]。因此, 严重故障校验应当重点考察交流系统与柔直输电系统交互影响下的电网稳定性。

2 柔直接入电网的影响评估及补强流程

柔直接入电网的影响评估及补强流程如图 2 所示。

评估流程详细阐述如下。

步骤 1: 基于实际电网的运行数据, 确定四种典型潮流方式的边界条件;

步骤 2: 调试典型运行方式潮流并计算;

步骤 3: 统计潮流结果, 进行 500 kV 线路静态安全分析及枢纽变电站电压校验, 若通过则到步骤

4, 否则对网架进行补强及无功调整后转步骤 2;

步骤 4: 对省网 500 kV 和 220 kV 网架短路电流水平进行校验, 若通过则到步骤 5, 否则采取限流措施降低短路电流, 再转步骤 2;

步骤 5: 进行省网小干扰稳定性计算与分析, 若存在弱阻尼模态则给出阻尼提升措施建议;

步骤 6: 进行省网 $N-1$ 故障暂稳校验, 若通过则转步骤 7, 否则需对潮流方式进行开机方式优化降低线路功率或进一步添加补强工程, 再转步骤 2;

步骤 7: 进行省网严重故障暂稳校验, 若通过则转步骤 8, 否则投入电网第二道防线的安全稳定控制措施, 再重新进行步骤 7;

步骤 8: 整理最终符合静态安全和暂稳特性要求的补强、限流、稳控措施, 结束。

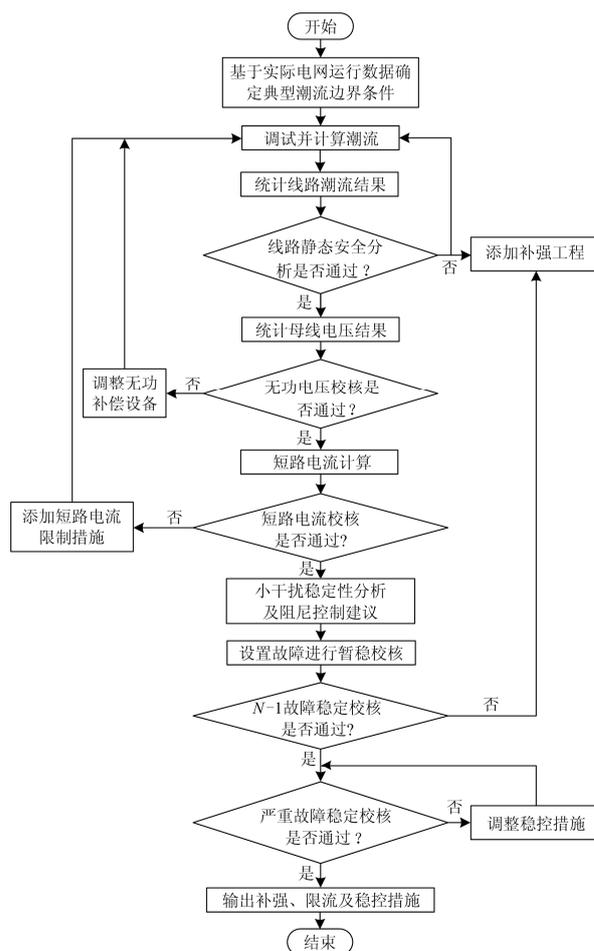


图 2 柔直接入电网影响评估及补强流程图

Fig. 2 Flow chart of influence assessment and reinforcing for the power grid integrated with back-to-back VSC-HVDC

3 案例分析

3.1 渝鄂背靠背柔性直流输电工程

为增强西南季节性水电外送能力, 提高联络线

输电容量以及运行控制能力,解除川渝电网对华中电网的故障冲击,国家电网公司规划将于2018年底建成投产±420 kV/5 000 MW 渝鄂背靠背柔性直流输电工程^[22]。该工程将原500 kV 张家坝-恩施双回、九盘山-龙泉双回交流联络线改为南北两条背靠背柔性直流互联通道,每条通道输电2 500 MW,实现重庆与湖北电网异步互联。如图3所示。

渝鄂同步联网下,原四回500 kV 交流线路在夏

季丰水期时向湖北电网输送总功率为2 800 MW。渝鄂背靠背柔直投产后,丰水期渝鄂断面传递潮流增至5 000 MW,现有网架结构的传输能力相对变弱,为保证湖北电网在渝鄂背靠背柔性直流输电工程投产后安全稳定运行,有必要进行影响评估。

本文利用电力系统分析综合程序(PSASP)对湖北电网进行适应性评估,根据评估反映的问题针对性地提出补强措施,保证湖北电网安全稳定运行。

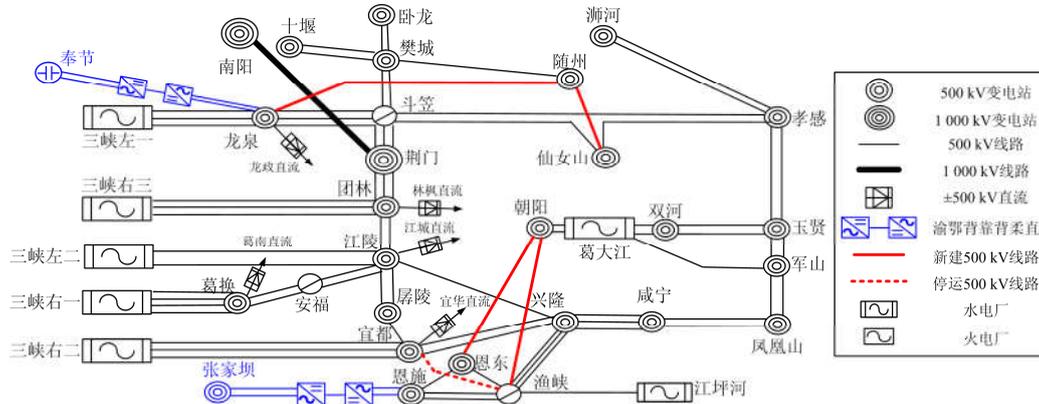


图3 渝鄂背靠背及相应补强工程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the Chongqing-Hubei back-to-back VSC-HVDC and corresponding reinforcing project

3.2 静态安全性

3.2.1 典型潮流方式及其分析

结合华中电网配套电源投产情况、省间断面输电能力、特高压交流线路送电能力以及华中主网安全稳定规定等因素,安排了湖北电网丰大、丰小、枯大、枯小四种典型运行方式下的潮流边界条件,如表1所示。

表1 湖北电网典型运行方式断面输电功率

Table 1 Transmission power of sections under the typical load flow of Hubei power grid

断面名	MW			
	丰大	丰小	枯大	枯小
鄂豫	5 600	5 100	-5 100	-5 000
鄂湘	0	0	-1 500	0
鄂赣	3 300	3 000	2 900	1 500
鄂渝	-5 000	-5 000	3 000	3 000

1) 渝鄂柔直及省内西电东送南通道

柔直南通道潮流疏散依靠500 kV 恩施-恩施东单回及恩施-渔峡双回线。恩施近区送电能力受渔兴三回线以及兴咸三回线的稳定规定限制。丰水期柔直南通道受电2 500 MW 时恩渔双回、渔兴三回和兴隆三回分别送电2 800 MW、4 000 MW 及5 100 MW,已不能满足N-1 静态安全稳定校核要求。

2) 渝鄂柔直及省内西电东送北通道

柔直北通道潮流疏散仅依靠500 kV 龙泉-斗笠三回线路。丰水期北通道受电2 500 MW 且三峡机组满发,龙斗三回线总共送电5 000 MW 以上,明显超过4 800 MW 的控制限额。

3.2.2 渝鄂背靠背柔性直流配套补强工程

渝鄂背靠背柔性直流接入湖北电网后,丰水期柔直落点地区潮流过重,多处500 kV 线路处于稳定极限甚至逼近热稳极限。为顺利疏散潮流,需对湖北电网进行补强。根据湖北电网结构及静态潮流分析结果,综合考虑实际电站出线度,提出如下补强措施:

① 渝鄂柔直及省内西电东送北通道,新建500 kV 龙泉至随州单回线(龙随线)及随州至仙女山单回线路(随山线)。

② 渝鄂柔直南通道出口,新建500 kV 恩施东至朝阳单回线(东朝线);渔峡至宜都线路改建为渔峡至朝阳(渔朝线)。

渝鄂背靠背工程投产后湖北500 kV 电网补强工程如图3所示。补强工程增加潮流疏散通道的同时增强了龙泉地区与鄂西北电网、恩施地区与鄂东电网的电气联系。

3.2.3 补强后湖北电网潮流特性

1) 渝鄂柔直及省内西电东送南通道

补强工程投产后,东朝、渔朝线增加了恩施地区北送朝阳的潮流通道,增强了该区潮流疏散能力。

丰大方式, 若柔直南通道受电 5 000 MW 的同时恩施地区上网水电增加至 1 000 MW。恩渔双回、渔兴三回、兴咸三回的潮流相比补强前下降至 1 740 MW、3 490 MW 及 4 348 MW, 均在控制限额内。新建的东朝线和渔朝线总共输送 2 200 MW 电力至朝阳变。补强后, 恩施上网容量增加, 该地区尚存潮流裕度。

2) 渝鄂柔直及省内西电东送北通道

补强工程投产后, 丰大方式下斗笠变电站出线近区潮流变化对比如表 2 所示。

表 2 补强前后斗笠近区潮流对比

Table 2 Contrast of power flow near Dou-li before and after reinforcement

线路名称	MW	
	补强前	补强后
龙斗 I/II/III	5 003	3 652
斗孝/斗山线	2 941	2 528
斗樊 I/II	2 213	1 664
龙随线	—	1 385
随山线	—	621

由表 2 可知, 补强后龙斗三回输电功率下降 1 351 MW, 转由龙随线承担; 斗樊双回北送潮流压力明显减轻, 仍有 600 MW 输电裕度; 斗孝/斗山两回线路仍有约 300 MW 输电裕度。柔直北通道补强前存在的龙斗三回、斗孝/斗山两回线潮流过载以及斗樊双回运行在极限状态的问题得以明显改善。

3.2.4 补强后湖北电网无功电压校验

湖北电网三峡恩施地区母线电压有相应稳定控制要求, 丰水期母线电压一般控制在 530 kV 及以上水平, 枯水期一般在 520 kV 以上, 540 kV 以下。

柔直接入及配套补强工程投产后, 湖北 500 kV 网架在枯小和丰小方式下存在三峡部分电站母线电压水平不合理。例如: 丰小方式下由于三峡地区潮流较重, 线路电压损耗较大, 荆门、团林站母线电压在 510 kV 以下。现状电网荆门团林地区低压并联电容器已全部投入, 进行无功扩容后将该 2 处母线电压升高至 520 kV 左右。

3.3 短路电流水平

3.3.1 500 kV 母线短路电流及限流措施

补强前湖北电网 500 kV 母线短路电流都未超过断路器遮断容量。补强后, 补强线路近区 500 kV 站点短路电流提升明显, 如: 朝阳母线短路电流比补强前增加约 11 kA。江陵 500 kV 母线短路电流达到 63.26 kA, 已超出断路器遮断容量, 其他各母线短路电流仍在断路器遮断容量以内。

针对江陵站母线短路电流越限情况, 采取限流

措施为: 将江兴 II 回、江仙线改接至安福。线路改接前后短路电流结果如附录表 4 所示。改接后江陵短路电流降至 63 kA 以下, 安福短路电流有所上升但均在可控范围内。

3.3.2 220 kV 母线短路电流及限流措施

补强前后湖北 220 kV 母线短路电流如附录表 5 所示。可以看出, 补强后 220 kV 的鄂州二期和大湾母线短路电流上升明显, 已超过 50 kA。补强后 220 kV 母线短路电流共 8 处越限, 需添加限流措施。

基于现有的 220 kV 电网分区结构, 对部分母线采取分母运行方式或在不影响供电可靠性的基础上切除部分线路。在相应限流措施下湖北 220 kV 短路电流均控制到 50 kA 遮断容量以内。

3.4 小干扰稳定性

渝鄂柔性直流工程投产后, 湖北电网小干扰稳定分析结果参见附录表 6, 湖北电网存在 3 个弱阻尼振荡模态, 主导参与机组均为恩施地区小水电机群。

补强后湖北电网弱阻尼模式减少为 2 个, 且这两个模式阻尼比基本不变。建议设计电力系统稳定器(PSS)或阻尼控制器以提高湖北电网稳定性。

3.5 暂态稳定特性

3.5.1 湖北 500 kV 网架 N-1 故障暂稳校验

湖北电网 500 kV 网架单一元件故障包括: 500 kV 交流线路三相永久接地短路故障后跳开单回故障线路(三永 N-1 故障); 湖北三峡外送 ±500 kV 直流线路发生单极闭锁。

补强前, 枯水期方式湖北 500 kV 线路均能通过三永 N-1 故障暂稳校验, 丰水期方式不能全部通过, 失稳线路集中在恩施渔峡地区。宜兴 I 回、兴仙线、江兴线发生三永 N-1 故障后, 均存在恩施上网的部分小水电机组功角失稳, 同时恩施 500 kV 母线电压发生持续振荡, 系统不能够稳定运行。

补强后, 4 种运行方式下湖北 500 kV 线路三永 N-1 故障暂稳校验全部通过, 解决了背靠背柔直接入湖北 500 kV 交流电网的 N-1 故障失稳问题。

图 4(a)和图 4(b)分别给出了补强前后丰大方式宜兴 I 回三永 N-1 故障下, 恩施与三峡机组相对功角曲线以及恩施母线电压曲线。

从图 4(a)可看出, 补强前的网架下发生故障恩朝阳寺发电机功角在故障发生约 3 s 后与三峡机组失步, 系统功角失稳; 补强后的网架同样故障下功角振荡能够得到平息。从图 4(b)看出, 与补强前相比, 补强后恩施 500 kV 母线电压在相应故障下不再持续振荡。图 4 分别从功角和电压角度说明了补强后湖北电网暂态稳定性能的改善。

在 4 种典型潮流运行方式下对三峡外送直流线路进行单极闭锁故障校验, 均无稳定问题。

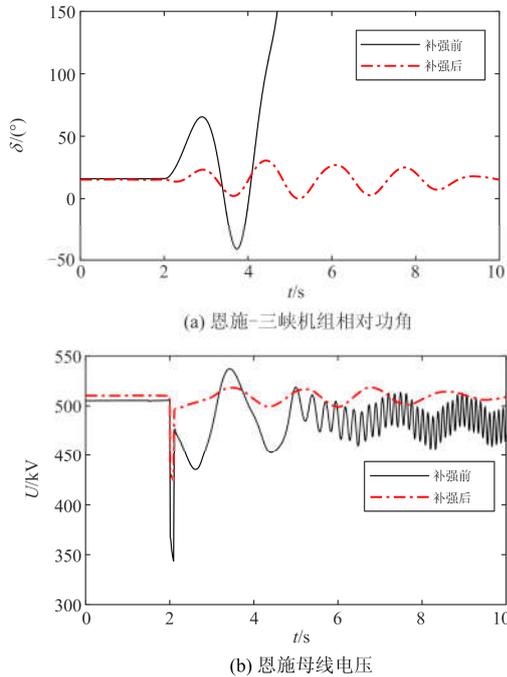


图 4 补强前后宜昌 I 回 N-1 故障暂稳曲线

Fig. 4 Transient stability curve before and after reinforcement under N-1 fault of Yi-xing I line

3.5.2 湖北 500 kV 网架严重故障及稳控措施

湖北电网 500 kV 网架严重故障包括: 500 kV 同杆并架交流线路发生三相永久短路故障后跳开双回线路(三永 N-2 故障); 湖北三峡±500 kV 直流外送线路发生双极闭锁。

补强前丰水期, 三峡左一-龙泉、左二-江陵、右三-团林、葛洲坝-安福、安福-江陵及龙泉-斗笠此 6 处 500 kV 三峡外送线路 N-2 故障会导致系统失稳。

补强后, 北通道近区线路 N-2 故障系统暂稳特性有所提升。表现为: 丰水期龙斗线 N-2 故障不再失稳, 其余 5 处三峡外送线路 N-2 故障依旧存在暂态失稳问题。采取相应稳定控制措施为: 在故障发生后及时就近切除三峡水发电机组若干台。

以三峡左一-龙泉线路三永 N-2 故障为例, 故障发生跳双回后及时切除 3 台左一发电机组。图 5(a) 给出了该故障下有无稳控措施时的三峡左一-右一机组相对功角对比曲线。由图 5(a) 看出, 无措施时故障后三峡左一机组很快与湖北主网失步, 系统失稳; 加入切机措施后, 三峡左一剩余机组功角振荡能够平息, 系统稳定。

补强后枯水期, 湖北三峡外送±500 kV 直流线路发生双极闭锁引起的功率冗余能得以疏散, 电网

能够稳定运行; 丰水期方式下三峡地区线路重载, 任一三峡外送±500 kV 直流线路发生双极闭锁时将引起三峡机组功角失稳, 长南线功率、三峡近区母线电压均持续振荡, 需采取稳控措施。可根据直流线路闭锁后功率冗余量就近切除三峡水电若干台。

图 5(b) 给出了丰大方式龙政双极闭锁后有无稳控措施下的龙泉母线电压对比曲线, 切机能及时削减龙政双极闭锁的冗余功率, 龙泉站电压不再振荡。

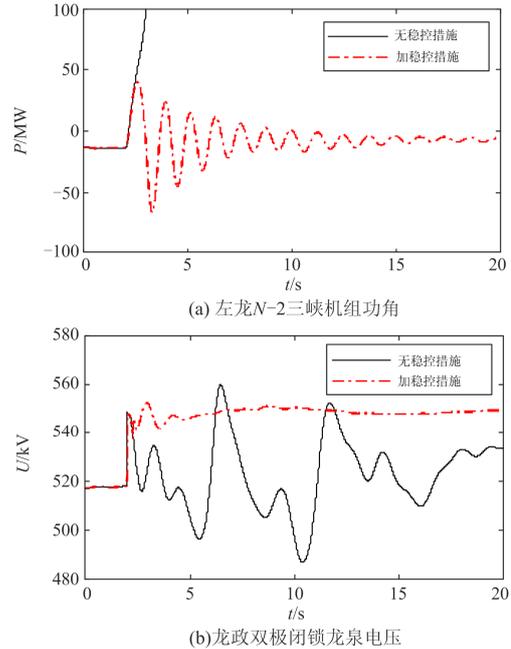


图 5 有无稳控措施下故障暂稳曲线

Fig. 5 Transient stability curve with or without control measures

3.5.3 特定运行方式下孤网运行风险

如图 3 所示, 补强前网架在龙斗线一回检修剩余两回故障同跳时, 渝鄂直流、龙政直流、三峡左一及龙泉馈供区形成孤岛; 补强后该运行工况下龙随线维持了龙泉地区与湖北主网的电气联系。

在龙斗一回检修运行方式下、剩余两回线路发生故障同跳时, 网架补强前后分别切除 6 台三峡机组后的龙泉母线频率对比曲线如图 6 所示。由图 6 看出, 补强前网架即使加入切机措施, 龙泉母线频率也突破 52 Hz, 孤网无法稳定; 补强后网架由于龙随线的存在, 相应故障下及时切机能够维持系统稳定运行。即补强工程为解决特定运行方式下柔直北通道孤网问题提供可能的紧急控制措施。

3.5.4 柔直闭锁对湖北电网暂稳特性影响

目前, 渝鄂柔直工程尚未建设完成, 背靠背柔直系统详细模型尚在研究中, 换流器控制保护参数仍不明确。为分析渝鄂柔直与湖北交流电网的交互影响, 本文通过设置一组较严苛的柔直保护参数使

换流器在一些严重的交流系统故障下发生闭锁, 分析柔直在交流系统故障扰动过程中发生闭锁时湖北电网暂稳特性的变化。

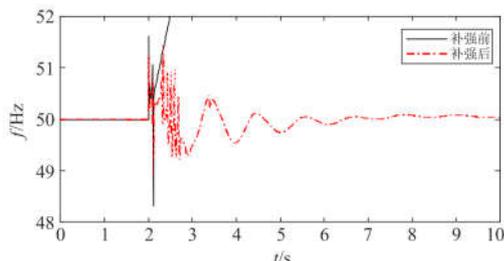


图 6 补强前后龙泉母线频率

Fig. 6 Frequency curve of Longquan bus before and after the reinforcement

以湖北电网补强后丰大运行方式下龙泉-斗笠线路三永 N-2 故障为例。先对比渝鄂柔直闭锁后湖北电网与邻省电网联络线功率特性的变化, 找到柔直闭锁后湖北功率缺额的补偿来源。又考虑到渝鄂柔直背靠背工程落点恰处于湖北电网丰水期稳定问题较为突出的三峡、恩施地区, 柔直闭锁对该地区的暂态稳定性的影响应加以重点分析。

① 省间联络线功率特性

故障前后各断面潮流稳态值变化如表 3 所示。由表 3 可看出, 龙斗线 N-2 故障引起渝鄂柔直北通道闭锁后鄂渝断面 2 500 MW 功率不平衡量几乎全部由鄂豫断面完成调节, 其余省间断面的潮流变化很小。

表 3 故障前后各断面潮流稳态值变化

Table 3 Sectional flow steady-state value change before and after fault

MW			
潮流断面	故障前稳态	故障后稳态	变化量
鄂豫	5 604	3 184	-2 416
鄂湘	0	-27	-27
鄂赣	3 252	3 248	-4

图 7 进一步给出柔直不闭锁与闭锁时鄂豫断面潮流交换曲线。

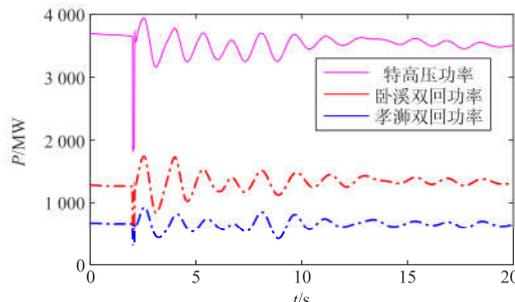
由图 7 可以看出, 渝鄂柔直北通道闭锁以后, 鄂豫断面潮流将会发生比较明显地波动, 500 kV 联络线功率振荡基本得到平息并过渡到新的运行状态。在柔直闭锁情况下, 1 000 kV 长南荆特高压鄂送豫功率存在频率约 0.1 Hz 且幅值衰减较慢的振荡模式, 20 s 后仍然存在较大幅度的功率振荡, 对特高压线路稳定运行产生不利影响。

② 三峡恩施地区功角特性

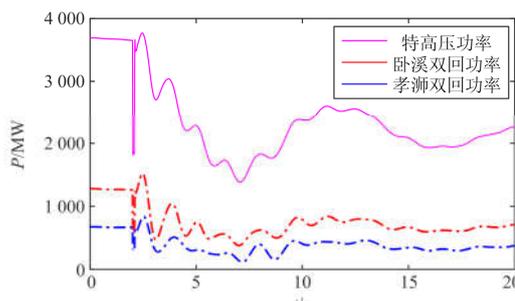
柔直闭锁与不闭锁时湖北电网相对功角曲线

如图 8 所示。

由图 8 (a)可以看出, 柔直发生闭锁时的三峡左一相对右一功角较不发生闭锁情况下的振荡幅度略有减小, 同时振荡平息的时间也有所减少。



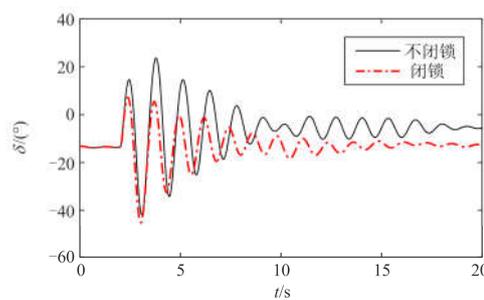
(a) 柔直不闭锁



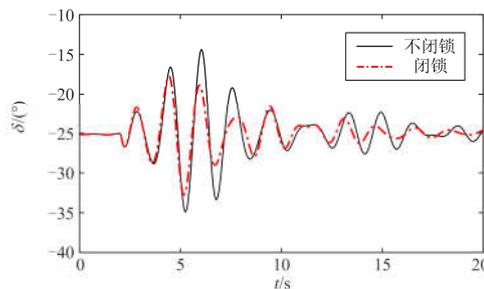
(b) 柔直闭锁

图 7 湖北与邻省的断面潮流交换情况

Fig. 7 Sectional flow exchange between Hubei province and its neighboring



(a) 左-右一相对功角



(b) 江坪-右一相对功角

图 8 柔直闭锁与不闭锁时机组相对功角

Fig. 8 Relative power angle when closed and locked

图 8(b)所示的闭锁时江坪机组相对三峡右一功角曲线的暂态特性比不闭锁时同样略有提升。而由于恩施地区江坪机组与柔直北通道电气距离较远,北通道闭锁引起功率变化对恩施地区机组的稳态运行点偏移基本可以忽略。

③ 三峡恩施地区电压特性

柔直闭锁与不闭锁时湖北电网三峡恩施地区 500 kV 关键站点母线电压如图 9 所示。

由图 9(a)看出,两种情形下,故障切除以后电压均可经过一定时间调节后恢复至故障前水平。故障若触发柔直闭锁,龙泉母线电压的振荡幅值比不闭锁时更小,振荡平息的时间也相应减小,柔直闭锁情况下龙泉母线电压具有更好的暂态特性;柔直闭锁情形下母线电压稳态值比不闭锁情况下恢复到更高水平。根据图 9(b),虽短路故障点距恩施电站较远,暂态过程中电压振荡幅值比龙泉电站小得多,但也可以看出柔直闭锁情况下恩施母线电压比不闭锁时有更好的暂态特性。

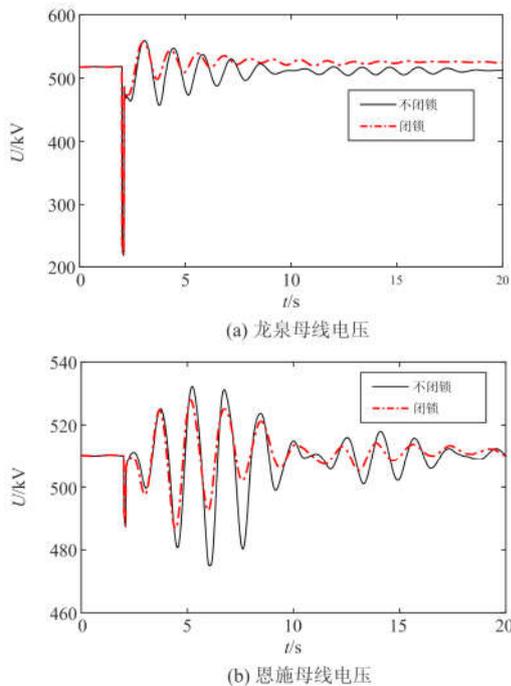


图 9 柔直闭锁与不闭锁时湖北关键母线电压
Fig. 9 Key bus voltages when locked and unlocked

④ 省内西电东送线路功率特性

柔直闭锁与不闭锁时湖北电网省内西电东送线路功率如图 10 所示。

由图 10(a)可见,相比不发生闭锁的情况,柔直闭锁时斗孝线功率出现一个频率 0.1 Hz 左右的振荡模式,与长南荆特高压功率振荡频率基本一致,但斗孝线功率振荡幅值较小。由图 10(b)可见,柔直北

通道是否闭锁对兴咸线功率影响不大。

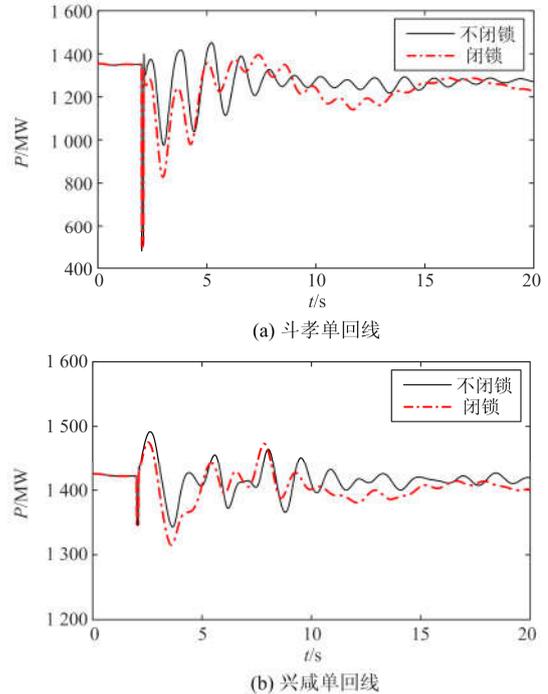


图 10 湖北电网省内西电东送线路功率
Fig. 10 Power transmission from West China to East China in Hubei Power Grid

综合算例仿真及其分析结果得出如下结论:湖北电网龙斗 N-2 故障若引起柔直闭锁,湖北三峡恩施地区暂态稳定性比柔直不发生闭锁时有小幅提升。

从湖北电网丰水期潮流分布特性可知:丰水期方式下,柔直输送功率方向为渝送鄂,湖北龙泉地区作为北通道落点汇集大量电能,如果湖北电网某些较为严重的交流故障扰动触发了柔直保护动作而闭锁,将会显著减小渝鄂柔直馈入湖北龙泉地区潮流,相应减小了该地区线路潮流大小。线路轻载后,湖北电网各机组的功角振荡幅值减小,同时也有利于湖北电网重要变电站故障后母线电压恢复。但是闭锁导致的湖北电网有功缺额将会由河南电网支援,会导致鄂豫省间断面的长南荆特高压线路出现较长时间的功率振荡过程,威胁特高压安全稳定运行。

4 结论

本文提出的适应于背靠背柔性直流工程投产对省级电网运行特性影响的评估方法,能够从潮流运行方式、线路静态安全分析、母线无功电压及短路电流、小干扰稳定分析及典型故障下系统暂稳特性等方面全面地评估柔直工程投产对省网运行特性的影响。根据评估结果,可以有针对性地对网架结构进行补强或调整,并制定系统严重故障下相应的稳

控措施, 保证电网安全稳定运行。

以渝鄂背靠背柔直工程投产为例。根据湖北电网运行特性评估结果制定的网架补强方案能有效增强三峡恩施近区潮流疏散能力; 短路电流限制措施可有效降低湖北电网母线短路电流水平; 网架补强及稳控措施能保障湖北电网在短路故障下系统暂态稳定; 湖北电网严重故障若引起渝鄂柔性直流输电系统闭锁, 湖北三峡恩施地区暂态稳定性将有小幅提升, 但闭锁会导致鄂豫省间断面的长南荆特高压较长时间的功率振荡, 威胁特高压安全稳定运行。本文评估方法能有效指导湖北电网规划与调度控制, 保证湖北电网安全稳定运行, 同时也能为其他大型输变电工程投产对电网的运行特性影响评估提供有效参考。

附录

表 4 湖北 500 kV 电网线路改接前后短路电流

Table 4 Short-circuit current of Hubei 500 kV power grid before and after the line change

母线	无措施	kA			
		江仙线改接安福		江兴改接安福	
		短路电流	增量	短路电流	增量
江陵	63.26	62.02	-1.24	59.92	-3.34
安福	36.69	40.17	3.48	43.95	7.26
斗笠	60.93	60.85	-0.08	60.71	-0.22
荆门	60.29	60.18	-0.11	60.00	-0.29
团林	55.97	55.81	-0.16	55.56	-0.41

表 5 补强前后湖北 220kV 母线短路电流

Table 5 Short-circuit current of Hubei 220 kV power grid before and after the reinforcement

母线名	kA		
	补强前	补强后	增量
兴隆	54.81	55.06	0.25
玉贤	53.84	53.92	0.08
木兰	52.37	52.40	0.03
樊城	51.42	51.45	0.03
江陵	51.01	51.15	0.14
凤凰山	50.26	50.26	0.00
鄂州二期电	46.93	50.63	3.70
大湾	46.50	50.19	3.69

表 6 补强前后湖北电网小干扰稳定性

Table 6 Small signal stability of Hubei power grid before and after the reinforcement

编号	补强前		补强后	
	频率/Hz	阻尼比/%	频率/Hz	阻尼比/%
模态 1	2.36	0.12	2.35	0.12
模态 2	0.69	3.42	0.69	3.47
模态 3	0.98	3.89	—	—

参考文献

- [1] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14. TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [2] 徐政, 陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 1-10. XU Zheng, CHEN Hairong. Review and applications of VSC HVDC[J]. High Voltage Technology, 2007, 33(1): 1-10.
- [3] 鲍正杰, 李生虎. 基于 VSC-HVDC 有功支援和自适应低频减载的区域电网频率控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 32-37. BAO Zhengjie, LI Shenghu. Frequency control for regional system based on active power support from VSC-HVDC and adaptive under-frequency load shedding[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 32-37.
- [4] 邓健俊, 文安, 魏承志, 等. 含柔性直流输电的交直流并列系统有功潮流优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 118-123. DENG Jianjun, WEN An, WEI Chengzhi, et al. An optimization method for active power flow in AC/VSC-HVDC parallel transmission systems[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 118-123.
- [5] 柯圣舟, 郑欢, 林毅, 等. 计及柔性直流输电系统损耗模型的交直流电网无功优化[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3052-3058. KE Shengzhou, ZHENG Huan, LIN Yi, et al. Reactive power optimization of AC-DC grid in consideration of VSC-HVDC transmission loss model[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3052-3058.
- [6] 顾益磊, 唐庚, 黄晓明, 等. 含多端柔性直流输电系统的交直流电网动态特性分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 27-34, 58. GU Yilei, TANG Geng, HUANG Xiaoming, et al. Dynamic characteristic analysis of hybrid AC/DC power grid with multi-terminal HVDC based on modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 27-34, 58.
- [7] 付强, 杜文娟, 王海风. 多端柔性直流接入对交流系统功角稳定性的影响[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 34-40. FU Qiang, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Angular stability of power systems integrated with VSC-MTDC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 34-40.
- [8] 郑超, 滕松, 宋新立, 等. 百万千瓦级柔性直流接入大电网后的系统特性分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 15-19, 26.

- ZHENG Chao, TENG Song, SONG Xinli, et al. Analysis on system characteristics after incorporation of $\pm 320\text{kV}/1000\text{ MW}$ VSC-HVDC into Dalian power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 15-19, 26.
- [9] 徐友平, 张珂, 潘晓杰, 等. 渝鄂背靠背柔性直流附加阻尼控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 163-169.
- XU Youping, ZHANG Ke, PAN Xiaojie, et al. Damping control based on back to back VSC-HVDC connecting Chongqing and Hubei power grid[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 163-169.
- [10] 阳岳希, 杨杰, 贺之渊, 等. 基于 MMC 的背靠背柔性直流输电系统控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 120-124, 157.
- YANG Yuexi, YANG Jie, HE Zhiyuan, et al. Control strategy of MMC based back-to-back HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(04): 120-124, 157.
- [11] 丁明, 李小燕, 毕锐, 等. 含 VSC-HVDC 的交直流混合发输电系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2008, 32(16): 53-58.
- DING Ming, LI Xiaoyan, BI Rui, et al. Reliability assessment of hybrid AC /DC power system containing VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 53-58.
- [12] 谢绍宇, 王秀丽, 王锡凡. 交直流混联系统可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 10-16.
- XIE Shaoyu, WANG Xiuli, WANG Xifan. Reliability estimation of AC/DC hybrid power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 10-16.
- [13] 电力系统安全稳定导则: DL 755—2001[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [14] 徐政. 交直流电力系统动态行为特性分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [15] 刘楠, 唐晓骏, 张文朝, 等. 特高压接入河南电网后电磁环网解环方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(2): 131-136, 141.
- LIU Nan, TANG Xiaojun, ZHANG Wenchao, et al. Study on electromagnetic ring opening in Henan province under ultra-high voltage power grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(2): 131-136, 141.
- [16] 袁娟, 刘文颖, 董明齐, 等. 西北电网短路电流的限制措施[J]. 电网技术, 2007, 31(10): 42-45.
- YUAN Juan, LIU Wenying, DONG Mingqi, et al. Application of measures limiting short circuit currents in Northwest China power grid[J]. Power System Technology, 2007, 31(10): 42-45.
- [17] 刘焱. 湖北电网短路电流限制措施研究[J]. 湖北电力, 2013, 37(3): 47-49, 52.
- LIU Yan. Restrictive measures for short circuit current of Hubei power grid[J]. Hubei Electric Power, 2013, 37(3): 47-49, 52.
- [18] 陈刚, 丁理杰, 李旻, 等. 异步联网后西南电网安全稳定特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 76-82.
- CHEN Gang, DING Lijie, LI Min, et al. Stability characteristics of southwest China power grid after asynchronous interconnection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 76-82.
- [19] 黄淼, 文旭, 刘育明, 等. 地区电网孤网运行事件的实例分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 166-170.
- HUANG Miao, WEN Xu, LIU Yuming, et al. Case analysis for isolated operation of a regional power network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 166-170.
- [20] DUTTA S, SADHU P K, REDDY M J B, et al. Shifting of research trends in islanding detection method—a comprehensive survey[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 1-20. DOI: 10.1186/s41601-017-0075-8.
- [21] 李鹏飞, 顾雪平, 杨超, 等. 考虑潮流转移对系统影响的低频减载方案优化[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 156-163.
- LI Pengfei, GU Xueping, YANG Chao, et al. Optimization of low-frequency load shedding scheme considering the influence of power flow transferring on the power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 156-163.
- [22] 蔡德福, 周鲲鹏, 董航, 等. 渝鄂柔性直流背靠背联网工程对湖北电网运行特性的影响[J]. 湖北电力, 2017, 41(1): 9-13.
- CAI Defu, ZHOU Kunpeng, DONG Hang, et al. Influence of back-to-back VSC-HVDC project on the operation characteristic of Hubei power grid[J]. Hubei Electric Power, 2017, 41(1): 9-13.

收稿日期: 2018-02-09; 修回日期: 2018-05-30

作者简介:

李大虎(1978—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: 6517562@qq.com

张志杰(1995—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为交直流混联电网稳定性分析与控制; E-mail: zhijie_sgo@hust.edu.cn

姚伟(1983—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为大电网稳定性分析与控制、柔性直流输电系统及其控制等。

E-mail: w.yao@hust.edu.cn

(编辑 葛艳娜)