

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.04.028

适用于多直流馈入电网的频率弹性评估方法

刘阳¹, 曹毅¹, 赵欣²

(1. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024;

2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:为精准定量评估交直流混联电网遭受故障后的频率恢复能力,文中提出一种适用于多直流馈入受端电网的频率弹性评估方法。首先,针对不同直流闭锁故障进行仿真计算,掌握电网故障后的频率变化特征;然后,计算一次调频期间实际频率曲线与恒定频率曲线之间的面积,将其作为电网频率弹性评估指标,并建立各种直流闭锁故障与频率弹性指标的映射关系。所提方法不仅能实现多直流馈入电网频率弹性评估,还可定量对比不同措施对频率稳定性提升效果。最后,以华东实际电网为例进行仿真验证,分析增加燃机等多种措施对频率稳定性提升效果,结果表明文中所提频率弹性评估方法正确且有效。

关键词:多直流馈入电网;频率稳定性;弹性评估;直流闭锁;一次调频

中图分类号:TM712

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2021)04-0195-05

0 引言

近年来,随着基于电网换相整流器技术(line-commutated converter, LCC)的特高压直流工程在我国陆续投运,区外来电已成为经济发达地区电网的主要区外电源^[1-6]。特高压直流输电在远距离传输和隔离交流电网故障方面具有天然优势,为解决我国西部地区新能源外送和负荷中心电力紧缺问题提供了有效解决措施,但直流换相失败和闭锁等故障增加了电网运行的安全风险^[7-11]。如何精准、定量地对多直流馈入电网的运行稳定性进行评估,已成为诸多学者研究的重点^[12-13]。

经过多年研究,国内外学者提出了多种改善交直流混联电网频率稳定性的方法^[14-16]。文献[17]提出多直流功率紧急支援协调控制技术,并以华东多直流馈入电网为例进行验证。文献[18]提出综合电网就地 and 远方信息的直流频率调制与紧急功率支援控制方案,改善电网频率稳定性。文献[19]为减小交流电网事故后的频率急剧下降和波动,提出用于互联交流电网的频率支援及恢复策略,保障电网在安全频率范围内运行并加速频率恢复速度。文献[20]提出交直流电网频率稳定紧急控制方法,通过三层向量机模型实现直流紧急功率支援和自动切负荷控制。现有电力系统稳定控制措施虽改善了交直流受端电网频率稳定性,但仍缺乏精准定

量评估各措施作用效果的统一衡量指标。

弹性概念已被应用于环境学、经济学和生物学等学科中。对电力系统而言,弹性可用于评估电网对扰动的预防抵抗能力、故障过程中的吸收响应能力以及电网的快速恢复能力^[21-24]。虽然电网弹性评估已取得一定进展,但交直流混联受端电网频率弹性精准评估目前尚处于起步阶段,缺乏成熟的研究成果。

综上所述,文中提出一种适用于多直流馈入电网的频率弹性评估方法,根据故障后电网频率变化特性,综合考虑直流闭锁损失的有功功率、发电机一次调频能力和负荷调频特性,精准评估受端电网的频率恢复能力以及各措施对电网频率稳定性提升的控制效果。

1 多直流馈入电网频率弹性评估模型

1.1 频率弹性评估指标

多直流馈入电网中,任一特高压直流闭锁后,典型电网频率变化曲线如图1所示。图中分为一次调频和二次调频阶段。一次调频由发电机的调速器完成,通常在8~15 s内结束;二次调频由自动发电控制(automatic generation control, AGC)实现,可使电网频率恢复至正常水平。由于故障后最低频率处通常采用一次调频,因此,文中所提频率弹性评估指标主要以一次调频阶段(故障后0~15 s)的频率变化情况为研究对象。

以直流闭锁后一次调频期间(0~15 s)实际频率与理想频率之间的面积为关键特征,提出频率弹性评估指标。

收稿日期:2021-01-22;修回日期:2021-04-03

基金项目:国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目“环境交互下的海上风电系统:多物理场模型与大数据研究”(5171101179)

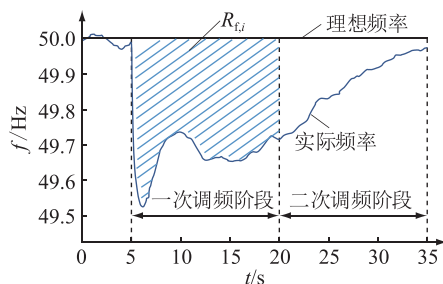


图1 直流闭锁后频率变化

Fig.1 Frequency variation after direct current blocking

$$R_f = \frac{1}{N_{\text{hvdc}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{hvdc}}} R_{f,i} = \frac{1}{N_{\text{hvdc}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{hvdc}}} \int_{t_s}^{t_e} \frac{f_i(t)}{f_s(t)} dt \quad (1)$$

式中： N_{hvdc} 为直流数量； $R_{f,i}$ 为直流*i*双极闭锁故障后，一次调频期间实际频率和理想频率之间的面积； t_s 为故障发生时刻； t_e 为一次调频结束时刻； f_s 为理想频率曲线； f_i 为实际频率曲线。

对于任一直流双极闭锁故障， $R_{f,i}$ 越大，表明实际频率与理想频率越接近，电网的频率恢复力越强。由于电网存在多回直流，选择所有直流双极闭锁的 $R_{f,i}$ 平均值作为电网的频率弹性评估指标，计算结果范围为(0,1]，数值越大，表明电网频率弹性越强。

1.2 频率弹性评估模型

为计算电网频率弹性评估指标，需建立相应的频率弹性评估数学模型。频率弹性评估目标函数如式(1)所示，约束条件主要包括交流电网潮流模型、特高压直流准稳态模型、电网机电暂态仿真方程。

1.2.1 交流电网潮流模型

交流电网的潮流方程为：

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{G,i} - P_{L,i} \pm P_{d,i} - \\ U_i \sum_{j \in i} [U_j (G_{i,j} \cos \theta_{i,j} + B_{i,j} \sin \theta_{i,j})] \\ \Delta Q_i = Q_{G,i} - Q_{L,i} \pm Q_{d,i} - \\ U_i \sum_{j \in i} [U_j (G_{i,j} \sin \theta_{i,j} - B_{i,j} \cos \theta_{i,j})] \\ \boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \ \theta_2 \ \cdots \ \theta_i \ \cdots \ \theta_n]^T \\ \mathbf{U} = [U_1 \ U_2 \ \cdots \ U_i \ \cdots \ U_n]^T \end{cases} \quad (2)$$

式中：节点功率方向以注入节点为正； $\Delta P_i, \Delta Q_i$ 分别为节点*i*有功、无功功率偏差； $P_{G,i}, Q_{G,i}$ 分别为节点*i*的发电机有功、无功功率； $P_{L,i}, Q_{L,i}$ 分别为负荷有功、无功功率； $P_{d,i}, Q_{d,i}$ 分别为交直流电网之间交换的有功和无功功率，整流侧取负，逆变侧取正； $G_{i,j}, B_{i,j}$ 为交流电网导纳矩阵元素； U_i, θ_i 分别为节点*i*的电压幅值和相角； n 为节点数量。

1.2.2 特高压直流准稳态模型

以图2所示双端直流系统为例，直流输电的潮流模型如式(3)一式(7)所示。

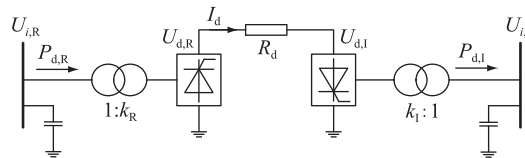


图2 双端直流系统模型

Fig.2 Model of two-terminal direct current system

$$U_{d,R} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} n_R k_R U_{i,R} \cos \alpha - \frac{3}{\pi} n_R X_{c,R} I_d \quad (3)$$

$$U_{d,I} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} n_I k_I U_{i,I} \cos \gamma - \frac{3}{\pi} n_I X_{c,I} I_d \quad (4)$$

$$P_{d,R} = U_{d,R} I_d \quad (5)$$

$$P_{d,I} = U_{d,I} I_d \quad (6)$$

$$U_{d,R} = U_{d,I} + R_d I_d \quad (7)$$

式中：下标R和I分别表示整流侧和逆变侧； U_d 为直流电压； U_i 为交流母线电压； n 为桥数； k 为换流变压器变比； α 为整流侧触发角； γ 为逆变侧熄弧角； X_c 为等效换相电抗； I_d 为直流线路电流； P_d 为直流有功功率。

1.2.3 电网机电暂态仿真方程

交直流混联电网的机电暂态方程为：

$$\varphi_{AC}(\dot{X}_{AC}, X_{AC}, Z_{AC}) = 0 \quad (8)$$

$$\varphi_{HVDC}(\dot{X}_{HVDC}, X_{HVDC}, Z_{HVDC}) = 0 \quad (9)$$

式中： φ_{AC} 为交流电网侧微分方程，包括发电机、负荷暂态模型； X_{AC}, \dot{X}_{AC} 分别为交流电网状态变量及其微分变量，包括发电机功角、励磁模型控制参数等； Z_{AC} 为交流电网控制变量； φ_{HVDC} 为直流控制模型等效微分方程； X_{HVDC}, \dot{X}_{HVDC} 分别为直流状态变量及其微分变量； Z_{HVDC} 为直流控制变量。

1.3 频率弹性评估流程

式(1)一式(9)组成了交直流混联电网的频率弹性评估模型，涉及多回直流分别发生闭锁后频率变化曲线特征提取以及频率弹性指标计算，具体评估流程如图3所示。

2 频率弹性评估方法在电网中的应用分析

为了验证所提电力系统频率弹性指标的有效性，以华东电网为例进行仿真计算。华东电网是我国电网的重要组成部分，属于典型多直流馈入受端电网，主要包括锦苏、雁淮、锡泰、宾金和复奉五大特高压直流。特高压直流给华东电网提供大量区外来电的同时，直流闭锁故障也带来了电网频率稳

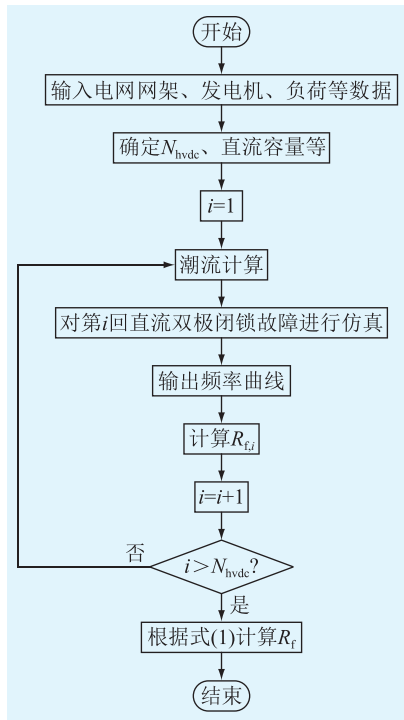


图3 频率弹性评估流程

Fig.3 The flow of frequency resilience evaluation

定隐患。以某年汛期低谷运行方式为例,所有特高压直流输送功率、电压等级信息如表1所示。

表1 华东电网特高压直流信息

Table 1 The ultra high voltage direct current data of East China power grid

序号	名称	落点	功率/万 kW	电压等级/kV
1	锦苏直流	江苏	650	±800
2	雁淮直流	江苏	476	±800
3	锡泰直流	江苏	427	±800
4	宾金直流	浙江	680	±800
5	复奉直流	上海	540	±800

仿真采用 Matlab 完成整体框架编程,并调用 BPA 进行潮流计算和机电暂态仿真。

2.1 电网频率弹性评估计算

根据仿真结果,锦苏等五回特高压直流闭锁后的电网最低频率变化曲线如图4所示。需要注意的是,弹性指标只需一次调频阶段的频率变化数据,为提升计算效率,BPA 暂态仿真未考虑二次调频,因此,二次调频阶段的频率曲线与实际变化存在差异,但不影响计算结果。

根据式(1)计算得到不同直流闭锁后的 $R_{f,i}$,如图5所示。分析可知,由于电网一次调频能力不变,直流闭锁后的 $R_{f,i}$ 与特高压直流输送功率的大小相关,直流功率越大, $R_{f,i}$ 越小,表明故障后频率恢复速度越慢;反之,则故障后频率恢复速度越快。计算

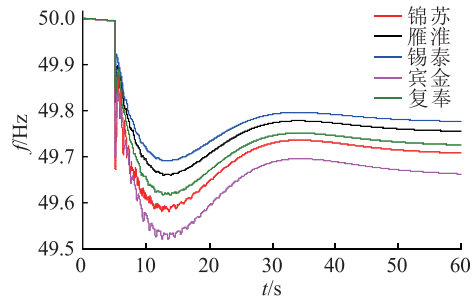


图4 不同直流闭锁后的频率变化

Fig.4 Frequency variation after different direct current blocked faults

可得,华东电网汛低运行方式下的 R_f 为 0.702。

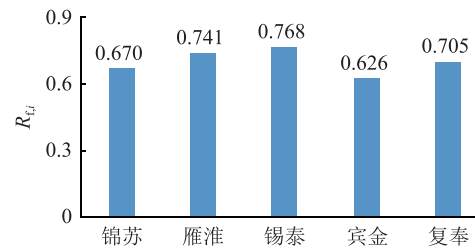


图5 不同直流闭锁后的 $R_{f,i}$

Fig.5 $R_{f,i}$ after different direct current blocking faults

2.2 不同控制措施提升电网频率弹性效果对比

基于文中电网频率弹性评估指标,对表2中常见电网控制措施提升电网弹性的效果进行对比分析。

表2 频率稳定性提升措施

Table 2 Frequency stability improvement methods

方案名称	具体内容
措施1	风电参与电网一次调频(30万 kW)
措施2	增加燃机(30万 kW)
措施3	负荷快速控制(切负荷 30万 kW)

华东电网汛低运行方式下,发生直流闭锁后,采用措施1~3前后频率弹性指标变化如表3所示。

表3 采用措施1~3前后的频率弹性指标对比

Table 3 Comparison of frequency resilience index before and after taking measure 1~3

方式	频率弹性指标			
	无措施	措施1	措施2	措施3
锦苏直流闭锁	0.670	0.678 3	0.670 5	0.680 0
雁淮直流闭锁	0.741	0.750 1	0.741 3	0.751 8
锡泰直流闭锁	0.768	0.778 8	0.768 6	0.779 0
宾金直流闭锁	0.626	0.634 6	0.626 2	0.636 7
复奉直流闭锁	0.705	0.714 0	0.705 6	0.716 2
整体电网	0.702	0.711 2	0.702 3	0.712 7

由表3可知,采用措施1~3后, R_f 分别提升了0.009 2,0.000 3,0.010 7。可见,发生直流闭锁后,

采用措施 1~3 可有效提升电网频率恢复速度、电网频率弹性及稳定性。且 3 种措施中,负荷快速控制措施提升电网弹性效果最好,风电参与一次调频次之,增加发电机效率再次之。实际电网运行中,建议深度挖掘电网可控负荷资源,以较小的成本有效提升电网频率弹性,加快故障后电网频率恢复速度。文中频率弹性评估指标可实现不同频率控制措施对于电网稳定性作用的精准定量对比计算,计算结果可用于实际电网的规划运行。

3 结论

随着我国特高压直流工程的不断建成投运,交直流混联特征日趋突显,直流闭锁后电网损失较大的有功功率,导致低频问题突出,给电网的安全稳定运行带来隐患。根据电网运行特性,合理精准评估多直流馈入电网遭受故障后的恢复能力,对于电网的规划运行有着重要的指导意义。

文中提出的适用于多直流馈入电网的频率弹性评估指标及方法,综合直流闭锁故障后的最低频率及频率恢复速度,实现了受端电网频率弹性的精确量化评估。以包含多回直流馈入的华东电网为例,对典型电网控制措施改善电网频率稳定性的有效性进行定量对比分析,结果表明风电一次调频、增加燃机、负荷快速控制等措施可有效提升电网频率恢复能力。其中,挖掘电网可控负荷资源可有效提升电网频率稳定性,为交直流混联受端电网的安全稳定运行提供有效保障。

参考文献:

- [1] XU J, LAN T K, LIAO S Y, et al. An on-line power/voltage stability index for multi-infeed HVDC systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(5): 1094-1104.
- [2] HU S, XIANG Y, ZHANG X, et al. Reactive power operability of distributed energy resources for voltage stability of distribution networks[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(4): 851-861.
- [3] LI G, AN T, LIANG J, et al. Studies of commutation failures in hybrid LCC/MMC HVDC systems[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 193-204.
- [4] CHEN Z X, WANG C, LI J, et al. Conductor selection and economic analysis of D. R. Congo-Guinea ± 800 kV UHVDC transmission project [J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(4): 385-397.
- [5] SHAKERIGHADI B, AMINIFAR F, AFSHARNIA S. Power systems wide-area voltage stability assessment considering dissimilar load variations and credible contingencies[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(1): 78-87.
- [6] YANG H, CAI Z X, ZHU L, et al. A novel assessment index of LCC-HVDC system impact on short-term voltage stability of the receiving-end AC system[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 142: 125-133.
- [7] SHARMA P, KUMAR A. Thevenin's equivalent based P-Q-V voltage stability region visualization and enhancement with FACTS and HVDC[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 80: 119-127.
- [8] WANG Z H, WANG J X, LI G Y, et al. Generation-expansion planning with linearized primary frequency response constraints [J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(4): 346-354.
- [9] WU L L, FAN X W, XU M, et al. Research and application of a power-flow-calculation method in multiterminal VSC-HVDC power grid[J]. Global Energy Interconnection, 2019, 2(1): 37-44.
- [10] KLETTKE A, SIEBERICH M, MOSER A. Operational concepts of HVDC in the context of security assessment in the German transmission grid[J]. Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 130-132.
- [11] ZHAO X, LIU Y, WU J, et al. Technical and economic demands of HVDC submarine cable technology for global energy interconnection[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(2): 120-127.
- [12] 胡忠山, 吴秋媚, 龚英明, 等. 谐波对高压直流输电系统换流站锁相环性能影响[J]. 广东电力, 2020, 33(11): 91-101. HU Zhongshan, WU Qiumei, GONG Yingming, et al. Influence of harmonics on performance of phase locked loop in HVDC converter station [J]. Guangdong Electric Power, 2019, 33(11): 91-101.
- [13] LI G, AN T, LIANG J, et al. Studies of commutation failures in hybrid LCC/MMC HVDC systems [J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 193-204.
- [14] 辛焕海, 章枫, 于洋, 等. 多馈入直流系统广义短路比: 定义与理论分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 633-647. XIN Huanhai, ZHANG Feng, YU Yang, et al. Generalized short circuit ratio for multi-infeed DC systems: definition and theoretical analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 633-647.
- [15] 肖浩, 李银红, 石东源, 等. 适用于多馈入直流系统静态电压稳定分析的综合短路比强度指标[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6471-6480, 6759. XIAO Hao, LI Yinhong, SHI Dongyuan, et al. Integrated short circuit ratio strength index for static voltage stability analysis of multi-infeed LCC-HVDC systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6471-6480, 6759.
- [16] 张啸虎, 陈陈. 系统结构对多馈入直流系统短路比的影响[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(16): 4777-4783, 4982. ZHANG Xiaohu, CHEN Chen. Influence of system structure on multi-infeed HVDC short circuit ratio [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4777-4783, 4982.
- [17] 许涛, 吴雪莲, 李兆伟, 等. 改善系统频率稳定性的多直流功率紧急支援协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 69-77, 143. XU Tao, WU Xuelian, LI Zhaowei, et al. Coordinated control

- strategy of multi-DC emergency power support to improve frequency stability of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22):69-77, 143.
- [18] 李兆伟,方勇杰,黄慧,等. 系统保护中跨区直流频率调制与紧急功率支援的协调控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(22):31-36.
LI Zhaowei, FANG Yongjie, HUANG Hui, et al. Coordinated control of cross-region DC frequency control and emergency power support in system protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22):31-36.
- [19] 孙凯祺,李可军,LAKSHMI Sundaresh,等. 基于直流互联的交流电网频率稳定控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(3):723-731.
SUN Kaiqi, LI Kejun, LAKSHMI S, et al. Frequency stability control research of AC grid based on HVDC transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3):723-731.
- [20] 胡益,王晓茹,滕予非,等. 基于多层支持向量机的交直流电网频率稳定控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14):4104-4118.
HU Yi, WANG Xiaoru, TENG Yufei, et al. Frequency stability control method of AC/DC power system based on multi-layer support vector machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14):4104-4118.
- [21] 刘林虎,金黎明,夏清,等. 电力系统输电运行弹性空间建模与效益评估[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5):7-13.
LIU Linhu, JIN Liming, XIA Qing, et al. Modelling and benefit evaluation of flexible space of transmission operation in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5):7-13.
- [22] 唐文虎,杨毅豪,李雅晶,等. 极端气象灾害下输电系统的弹性评估及其提升措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7):2244-2254, 2403.
TANG Wenhui, YANG Yihao, LI Yajing, et al. Investigation on resilience assessment and enhancement for power transmission systems under extreme meteorological disasters[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7):2244-2254, 2403.
- [23] 田沛川,李毓,王森,等. 针对小概率高损事件的配电网弹性评价问题研究[J]. 供用电, 2019, 36(5):14-20.
TIAN Peichuan, LI Yu, WANG Sen, et al. Research on resilience evaluation for distribution network under small-probability-high-loss events[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(5):14-20.
- [24] 杜雅昕,张婷婷,张文. 极端天气下计及电-气互联影响的配电网弹性评估[J]. 供用电, 2019, 36(5):8-13.
DU Yaxin, ZHANG Tingting, ZHANG Wen. Resilience assessment for distribution systems considering interconnections with gas systems under extreme weather[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(5):8-13.

作者简介:



刘阳

刘阳(1980),男,硕士,高级工程师,高级经济师,从事电力系统运行与人力资源管理工
作(E-mail:lvbaoshi@163.com);

曹毅(1984),男,硕士,工程师,从事电力系统稳定相关工作;

赵欣(1983),男,博士,讲师,研究方向为次同步振荡、无功优化、电力电子化电力系统。

Frequency resilience evaluation for multi-HVDC feed-in power grid

LIU Yang¹, CAO Yi¹, ZHAO Xin²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to evaluate the frequency recovery capability of AC/DC hybrid power grid after fault accurately and quantitatively, a frequency resilience evaluation method for receiving-end power grid with multi-high voltage direct current (HVDC) feed-in is proposed. Firstly, electromechanical transient simulations are carried out under different HVDC blocking faults so that the frequency variation of power grid is obtained. Then, the area between the frequency change curve and the constant frequency curve during the primary frequency regulation is calculated to evaluate the frequency resilience of the power grid. In this way, the mapping relationship between various DC blocking faults and frequency resilience index is established successfully. Proposed method not only can evaluate the frequency resilience of multi-HVDC feed-in power grid, but also can analyze the effect of different measures on improving frequency stability. In the end, taking the actual East China power grid as an example. The adaptability of the proposed index to evaluate the frequency stability of power grid is analyzed. The stability improvement effect of various measures such as increasing gas turbine is quantitatively tested. The results show that the proposed frequency resilience evaluation method is effective and correct, which can effectively guide the planning and operation of the actual power grid.

Keywords: power grid with multi-high voltage direct current (HVDC) feed-in; frequency stability; resilience assessment; HVDC blocking; primary frequency regulation

(编辑 吴楠)