

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.06.010

欧洲柔性直流电网的规划及其仿真研究

叶敏芝, 喻哲扬, 徐政

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:建立全球能源互联网是实现新能源大规模开发、高比例接入电网的重要发展方向。文中对柔性直流电网跨接在欧洲交流主网上的可行性及影响进行了深入分析。首先,梳理了欧洲资源负荷的分布情况,设计了直流换流站的位置、容量和直流网架的结构;然后,基于机电暂态仿真软件 PSS/E,在欧洲交流网架上建立了 51 端柔性直流电网;最后,针对柔性直流电网接入后交流电网的频率、电压稳定性,柔性直流电网对于交流网侧输入功率不稳定情况下的响应策略以及紧急功率支援能力等进行了仿真研究。仿真结果表明,规划的柔性直流电网能够提供功率支撑并降低换流站注入功率波动的影响,提高欧洲电网的稳定性。

关键词:柔性直流电网;欧洲电网;频率稳定;下斜控制;紧急功率支援

中图分类号: TM721

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2020)06-0066-10

0 引言

基于全球能源资源与负荷中心的逆向分布,建立全球能源互联网以实现在更大范围优化配置能源是解决新能源大规模开发、高比例接入电网的理想方案^[1]。基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的柔性直流输电技术,相比传统直流输电技术,具有无换相失败风险、有功无功独立控制、可以向无源电网提供支撑、谐波水平低等优势^[2-6],在构建全球能源互联直流电网过程中有着巨大的发展潜力。

直流电网是由多个换流站和输电线路组成的具有不同拓扑结构的输电网络。相比于交流联网,直流联网运行模式多,调节速度快,应用场景广,可实现多个异步交流系统互联,提高新能源并网的安全性;其次,相较于两端直流输电系统,直流电网还可以利用直流线路的互为冗余性转供负荷,减少系统停运风险等^[7]。直流电网是支撑未来全球能源互联网发展的主要技术方向之一。

目前,世界各国相继开展了直流电网工程的规划和建设。其中有欧盟的超级电网计划^[8-9]、美国的“Grid 2030”计划^[10]和中国张北柔性直流工程^[11]等。针对直流电网的研究主要集中于直流电网输电技术研究,包括直流电网故障清除能力^[12-14]、拓扑结构^[15]、控制策略^[16-17]等,而对于大型多端直流电网跨接涵盖多种场景的交流电网,交直流系统的响应特性研究较少。

欧洲电网作为世界上最大的区域互联电网^[18],直流系统典型应用场景众多,包含同步机电源送端

系统、高比例新能源电源送端系统、纯新能源电源送端系统、强受端系统、弱受端系统、无源受端系统等。对欧洲电网进行研究,将为我国能源互联网的建设以及全球能源互联网的建设提供借鉴。

针对以上问题,文中首先根据欧洲资源负荷的分布情况,设计了直流换流站的位置、容量,并利用内点法计算得到初步网架结构,分析形成最终直流规划网架;其次,基于机电暂态仿真软件 PSS/E,在欧洲交流网架上建立了 51 端直流电网;最后,针对直流电网对于欧洲交流电网的频率稳定性、功率波动控制、功率支援方面进行了仿真。仿真结果验证了所规划的柔性直流电网的可行性和有效性。

1 欧洲直流电网设计

欧洲主要划分为欧洲大陆、北欧、英国-爱尔兰、俄罗斯及周边 4 个区域。欧洲跨国互联紧密,在欧洲交流电网中,电力系统各个电压等级为 220 kV, 330 kV, 400 kV 和 750 kV。

根据欧洲资源分布和电力供需平衡分析,欧洲电力盈余主要集中在北欧、波罗的海国家,电力缺口集中在西欧、南欧和东欧,其中德国、法国、意大利电力缺口最大。国家间的电力输送量巨大,欧洲电力流总体呈“洲内北电南送、跨洲受入亚非电力”格局。按照 2050 年欧洲电力规划,欧洲跨洲区电力流的规模将达到 133 GW,包括跨洲电力流 75 GW 和跨区电力流 58 GW^[19],如图 1 所示。

1.1 欧洲直流电网换流站的选择

根据图 1 所示电力流,欧洲大陆(西欧、南欧、东欧)作为主要的电力受入区域,承接非洲、西亚、俄罗斯周边、不列颠方向来的电力。文中利用 2016

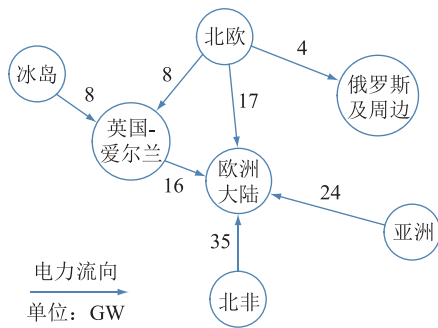


图1 2050 欧洲电力流规划

Fig.1 2050 European power flow planning

年欧洲各国负荷数据^[20],对欧洲大陆各国的负荷量占比进行了计算及排序,其中德国和法国占比超过15%,意大利、土耳其占比超过10%,西班牙、波兰占比超过5%。由图1可知馈入欧洲大陆的电力总量达到111 GW。考虑到各国负荷发展速度,设定德国、法国馈入电力30 GW,意大利馈入12 GW,土耳其馈入16 GW,西班牙、波兰馈入4 GW,其余各国按需求馈入0~2 GW 电力。

直流网架电压等级主要为500 kV,660 kV 和800 kV,目前800 kV 直流工程换流站的最大容量为8 GW,未来还会有上升空间。考虑到换流站容量,预计在德国、法国设立5~6个换流站,意大利设立3个换流站,换流站主要设立在经济、工业发达地区。

1.2 基于站点距离的网架规划方法

1.2.1 数学模型

换流站确定时,换流站之间的连接关系是影响到直流线路的距离,进而影响直流线路造价的主要因素。因此,基于站点距离的网架规划模型以换流站之间的距离总和最小为目标函数,达到线路造价的经济性目的^[21]。目标函数如下:

$$\min F = L \cdot w \quad (1)$$

式中: F 为换流站之间的距离总和; L 为可能建立的直流线路的距离量 l_i 构成的行向量; w 为对应直流线路是否建立的确定量 w_i 构成的列向量。其中 l_i 为标么值,以某一选定距离换算得到; $w_i = 1$ 表示直流线路 i 是建立的, $w_i = 0$ 表示直流线路 i 不建立。

为保证在网架连通情况下实现距离最短,设定约束条件为:

$$\det(\mathbf{K} \text{diag}(w) \text{diag}(L) \mathbf{K}^T) \neq 0 \quad (2)$$

式中: \mathbf{K} 为节点支路关联矩阵。

1.2.2 模型求解策略

假设陆地上采用架空线路,海上采用海底电缆进行传输。而电缆工程造价高于架空线路工程^[22],故海上距离乘以3换算为架空线路距离。

首先以节点间距离短为目标,选择待选支路,

生成节点支路关联矩阵 \mathbf{K} 和规划待选支路距离向量 L ,如附录中式(A1)、式(A2)所示,节点序列如附录中表A1所示。假设所有待选支路均要建立,即 $w_i = 1$ 。仿照内点法中迭代点寻优函数,设定步长为1,比较不同 w 下 F 值的大小,最终得到 F 值最小对应的 w 。不同的是,在这一函数中,直接加入了约束条件,没有额外的罚函数。

由于计算结果只是一个局部最优解,结果和 \mathbf{K} 中各列的位置有关。因此,利用迭代函数对 \mathbf{K} 中各列的位置进行多次随机变换,得到较优解,对应 w 如附录中式(A3)所示。

1.3 欧洲规划直流网架的建立

欧洲大陆汇集来自北欧、不列颠群岛、西亚、北非送来的电力。由于传输距离较长,考虑采用改造升级老旧线路的方法,整体直流网架规划见图2。欧洲规划直流网架具体换流站设立见附录中表A2。将待建换流站节点标注在地理图上,根据模型求解结果对各节点进行连线。由于得到的是较优解,因此手动调整得到理想解,如图2中红色线条所示。

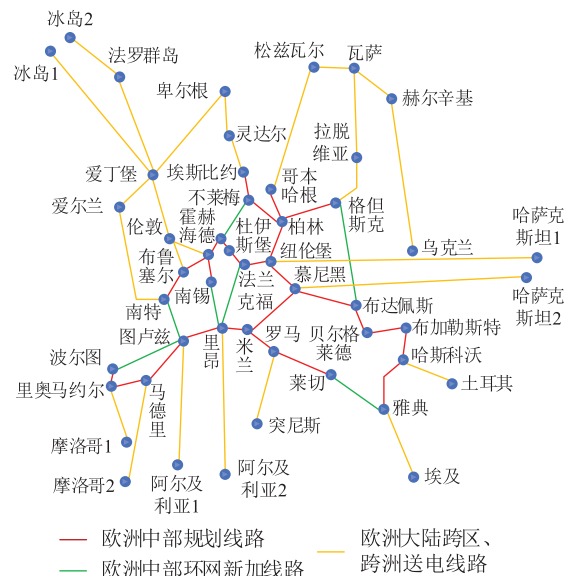


图2 欧洲直流网架示意

Fig.2 Schematic diagram of European DC grid

考虑到葡萄牙、西班牙仅通过马德里—图卢兹一条传输线与网架相连,可增加波尔图—图卢兹一线,形成环状,增加网架可靠性;考虑到意大利和希腊之间原有直流线路相连,可增设莱切—雅典传输线路,增加网架可靠性。此外,求解结果是一个类似链状的连通图,为了提高输电灵活性和运行可靠性,在此基础上增加南特—图卢兹、南锡—里昂、法兰克福—里昂、不莱梅—霍赫海德、格但斯克—布达佩斯等传输线,在欧洲大陆中部形成直流环网,如图2中红色和绿色线条所示。

按照上述规划,欧洲电网以欧洲直流电网为骨干网架跨接 7 个异步电网,包括冰岛电网、英国电网、爱尔兰电网、北欧电网、西欧电网、撒丁岛电网和非洲电网。根据附录中表 A2 各换流站的功率设定值,可以计算出通过直流电网的电力流,如图 3 所示。其中西欧电网受入北欧电力 24 GW、西亚电力 16 GW、北非电力 39 GW、不列颠群岛以及冰岛电力 16 GW,该电力流基本与欧洲电网 2050 年规划一致。考虑到欧洲直流网架中端对端连接换流站对应场景中多为纯新能源、高比例新能源送端或弱受端、无源受端,直流网架中各线路潮流方向不定,因此采用柔性直流换流站^[3]。

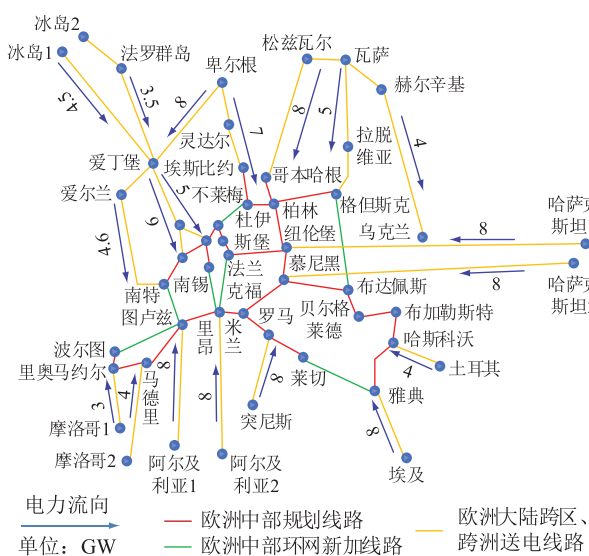


图 3 电力流示意

Fig.3 Schematic diagram of power flow

2 直流电网跨接后交流电网的频率稳定性分析

文中使用 2016 年欧洲交流主网架数据^[23]在机电暂态仿真软件 PSS/E 上建立欧洲高压交流网架和 51 端柔性直流电网。

对于直流电网故障,主要有线路故障和换流站故障。直流电网对交流电网的影响,最重要的因素为直流系统通过换流站向交流电网注入的功率。对于换流站故障,最严重的故障为换流站双极闭锁,交流电网瞬间产生一个功率缺额或盈余,该值最大时与换流站容量大小相等。

文中遍历建立的直流电网中每条直流线路,观察其发生 $N-1$ 断线故障时对交流电网的影响。根据图 3 中直流电网的结构,若单一线路送端或受端故障,最多会导致整个直流电网产生 8 000 MW 的缺额或是 4 000 MW 的盈余。对于功率盈余的情况,合理的处理方法之一是送端切机,对受电端的

影响较小。对于功率缺额的情况,可以采用电压下斜控制,将功率缺额分摊到各个受电换流站。针对上述情况,8 000 MW 的功率缺额对于分隔后的欧洲电网占比较小,将功率缺额分摊后对单个换流站的影响小于换流站闭锁产生的影响。

由分析可知,欧洲直流电网故障对交流电网的影响不超过单一直流换流站闭锁故障对交流系统的影响。现对欧洲大陆各个换流站发生 $N-1$ 闭锁故障进行扫描,各个换流站闭锁引起交流电网的频率偏差见附录中表 A3。可以看出,任意换流站闭锁后,交流系统仍能保持稳定,频率跌落在可接受范围内,交流系统可以承受直流换流站闭锁带来的频率偏差,在交流系统上跨接直流电网的方案可行。

3 送端系统发出功率不稳定时直流电网控制策略

3.1 定电压控制模式

目前建立的系统冰岛风电基地通过柔性直流换流站向超级电网输送 4 500 MW 有功功率。由于欧洲超级电网类似的高比例新能源送端场景众多,以此场景为例,探索送端系统功率发出不稳定对主网的影响。2 s 时,冰岛 2 送端换流站将注入直流系统的有功功率从 4 500 MW 调整至 2 500 MW,包括冰岛 2 换流站、爱尔兰海上风电场、爱尔兰换流站、伦敦换流站以及系统定电压站法兰克福站在内的临近换流站直流电压、直流电流及换流站向交流系统注入功率如图 4 所示。

英国本岛至欧洲大陆 3 条直流线路(爱尔兰—南特,伦敦—巴黎,伦敦—布鲁塞尔)电流及英国本岛与北欧电网连接线爱丁堡—卑尔根线路电流如图 5 所示。

根据仿真结果可知,当冰岛 2 换流站注入直流系统的有功功率降低后,冰岛 2 换流站注入直流系统直流电流降低,同时直流系统出现了功率缺额,各个换流站直流电压均有一定程度降低,直流系统定电压换流站增加注入直流系统的有功功率,维持该节点电压为设定值。由于功率缺额由定电压换流站独自承担,因此功率变化幅度较大。

达到新的稳定点后,系统定电压换流站(法兰克福换流站)电压不变。由于冰岛 2 换流站注入直流系统的功率降低,其与系统定电压站的压差减小,稳定后,换流站出口直流电压有一定程度的减小。而直流线路电流因为线路上传输的功率降低,冰岛 2—爱丁堡线路电流也降低,直流系统各条直流线路上电流重新分配。

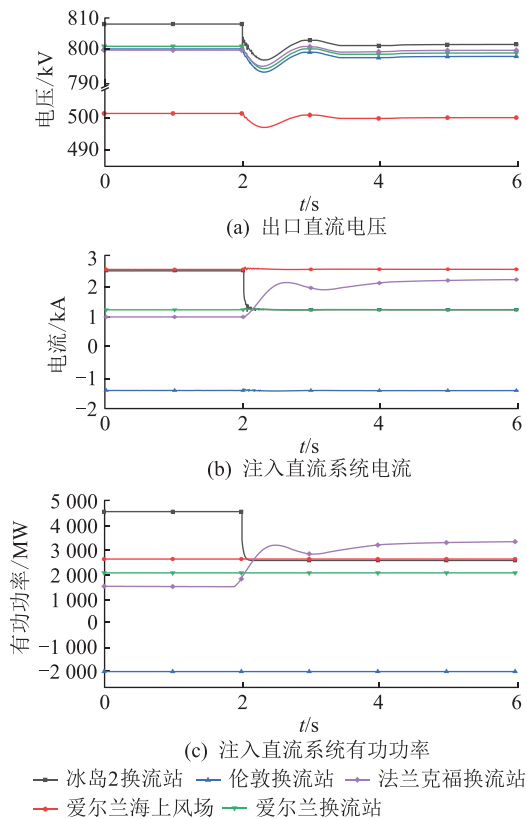


图4 各换流站功率和电压及电流

Fig.4 Power, voltage and current of each converter station

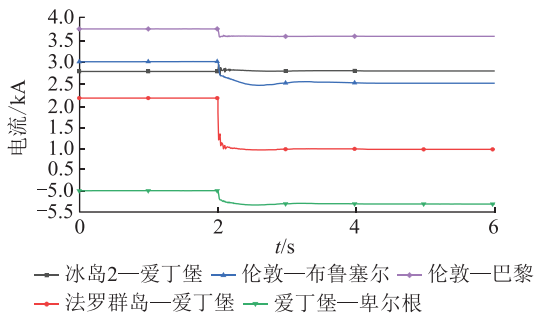


图5 直线路径电流

Fig.5 Current of DC line

3.2 下斜控制模式

直流电压下斜控制模式结合了定有功功率和定直流电压控制模式,无需控制模式的切换就能快速调整直流功率^[3],电压源型换流站处于直流电压下斜控制模式时的控制特性如图6(a)所示,直流电压下斜控制器结构如图6(b)所示。图中 P, P_{ref} 分别为直流功率的实际运行值和参考值; U_{dc}, U_{dref} 分别为直流电压的实际运行值和参考值; i_{dref} 为换流站外环控制生成的 d 轴分量参考值。直流电压和直流功率之间满足:

$$U_{dc} = U_{dref} + k(P - P_{ref}) \quad (3)$$

式中: k 为下斜系数。

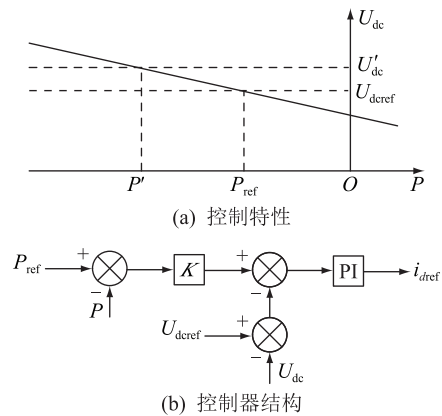


图6 下斜控制模式

Fig.6 Droop control mode

针对新能源基地输出功率不稳定的情况,考虑采用下斜控制策略,将功率波动值平均至附近多个换流站,以此减少对各个交流电网的影响。

按照输出功率是否可调,选西欧电网中容量较大的11个换流站作为功率可调站,分别为巴黎、南特、图卢兹、里昂、南锡、法兰克福、米兰、慕尼黑、不莱梅、柏林和杜伊斯堡。2 s时,冰岛2送端换流站将注入直流系统的有功功率从4 500 MW调整至2 500 MW,选择西欧功率可调站中巴黎、不莱梅和柏林作为代表换流站,输出以上三站及冰岛2换流站的直流电压、直流电流、换流站向交流系统注入功率如图7所示。同时输出以法兰克福站为定电压站时整个欧洲直流超级电网各换流站的直流电压、直流电流及换流站向交流系统注入功率作为对比,仿真结果如图8所示。

通过对比可以发现,单一定电压换流站,直流系统的功率偏差全部由定电压换流站法兰克福站承担;而采用下斜控制,则将直流系统的功率偏差平均分配至各个下斜控制换流站,将冰岛换流站注入直流系统的功率不均导致的扰动分布化。因此,采用下斜控制模式,可以避免采用单一定电压换流站时定电压换流站的过负荷情况,改善直流系统受到扰动后的稳定性。

4 常规直流闭锁时直流电网紧急功率支援策略

2050年北欧电网有丰富的电力盈余,北欧电网与西欧电网异步互联。北欧的能源不仅可通过欧洲直流电网的方式送往西欧电网,还可通过点对点的方式送往西欧电网。多个直流送电系统互为补充,如图9虚线所示,假设在欧洲直流电网不莱梅换流站附近,落点一回挪威送往西欧的常规直流,该常规直流线路的电压和容量为800 kV,2 000 MW,

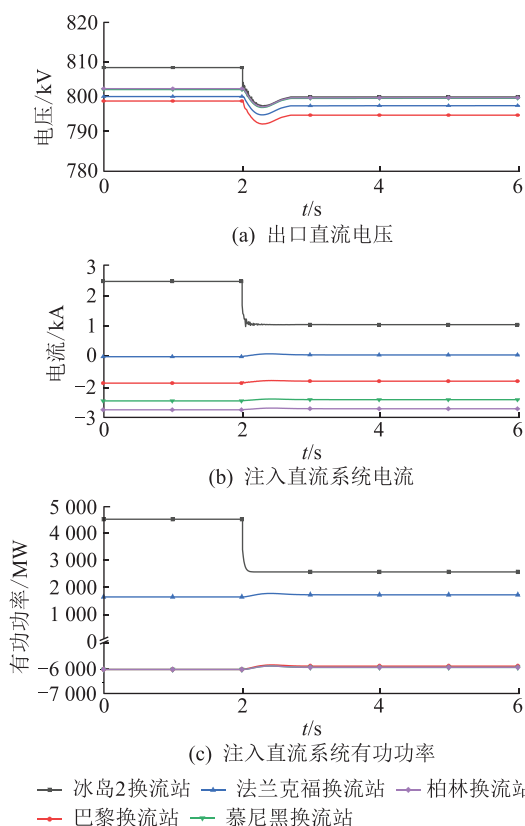


图7 下斜控制方式下各换流站电压和电流及有功功率
Fig.7 Voltage, current and power curve diagram of each converter station under droop control mode

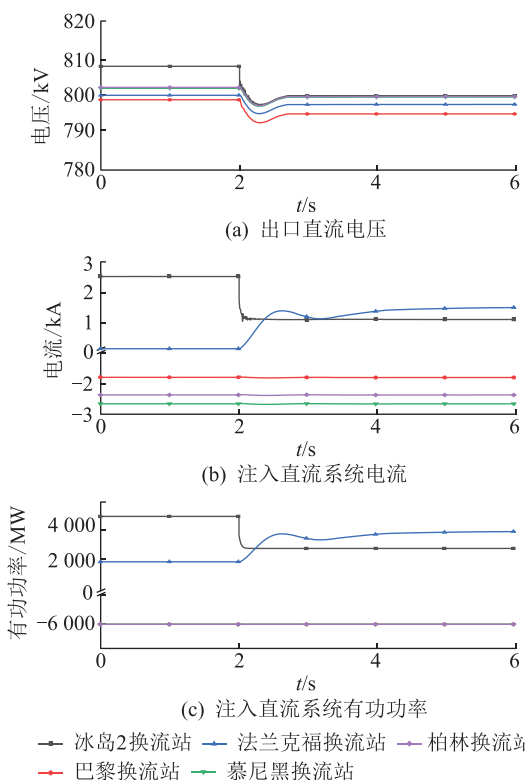


图8 定电压控制方式下各换流站电压和电流及有功功率
Fig.8 Voltage, current and power of each converter station under constant voltage control mode

假设该回直流发生双极闭锁故障,会瞬间导致西欧电网的功率缺损和北欧电网的功率盈余。此时可增加北欧电网通过欧洲直流电网送往西欧电网的功率,补偿常规直流闭锁产生的功率缺损。

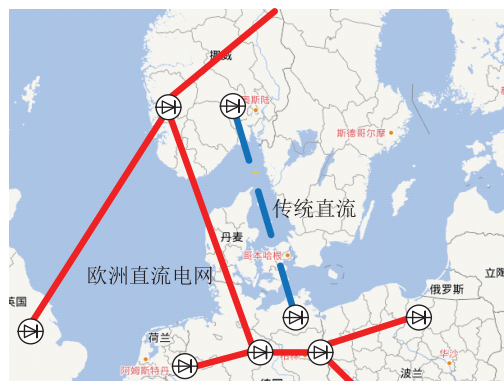


图9 多直流系统互联示意

Fig.9 Schematic diagram of interconnection of multiple DC systems

设置2 s时挪威—不莱梅的常规直流发生双极闭锁故障,常规直流传输功率见图10。若不采用紧急功率支援,不莱梅站、柏林站和卑尔根站的功率值、直流电压、直流电流见图11。若采用紧急功率支援策略,故障发生后迅速抬升不莱梅站,柏林站功率设定值,不莱梅站、柏林站和卑尔根站的功率值、直流电压、直流电流见图12,西欧电网、北欧电网在采用紧急频率支援策略后的频率对比见图13。

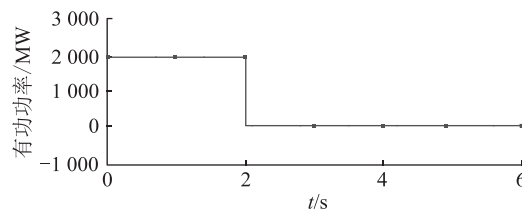
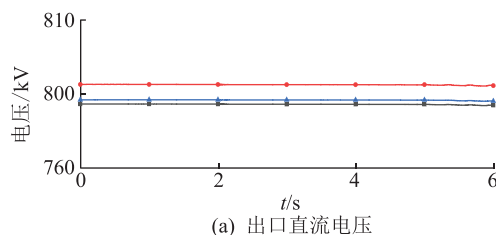


图10 常规直流传输有功功率

Fig.10 Conventional DC transmission power

通过对比可以发现,若采用紧急功率支援策略,在常规直流发生单回双极闭锁故障后,增加直流电网中北欧电网向西欧电网输送的电力,减小常规直流造成北欧电网功率盈余和西欧电网功率缺损。通过频率的对比可见,故障后,北欧和西欧电网的扰动降低,证明了采用紧急功率支援策略,可提高系统的稳定性。



(a) 出口直流电压

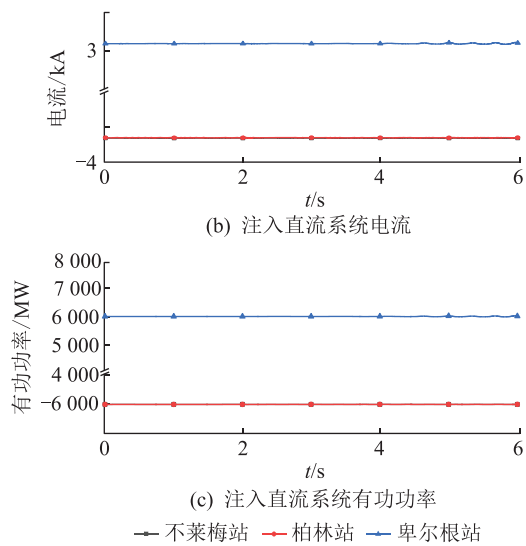


图 11 无功功率支援时各换流站电压和电流及有功功率

Fig.11 Voltage, current and power of each converter station without power support

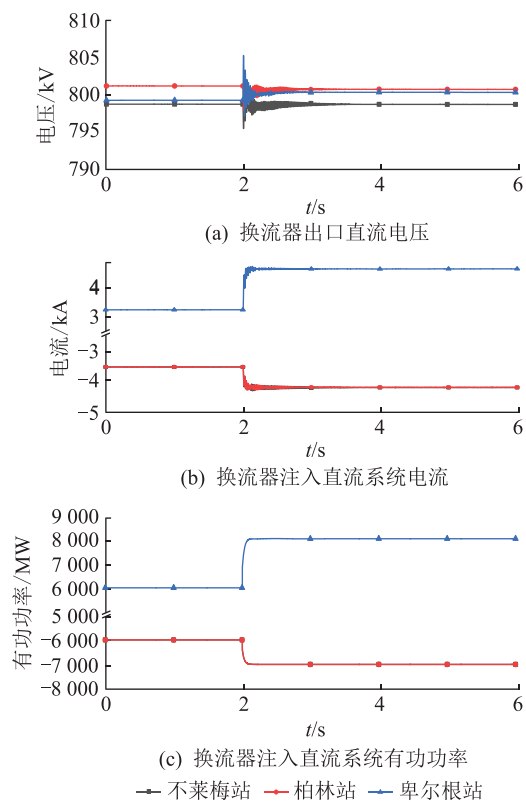


图 12 功率支援时各换流站电压和电流及有功功率

Fig.12 Voltage, current and power of each converter station during power support

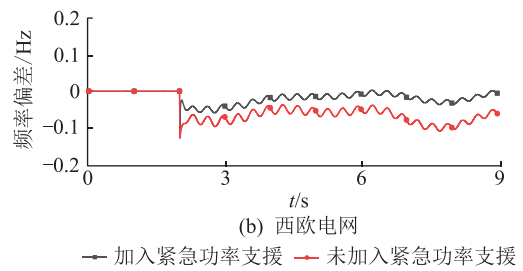
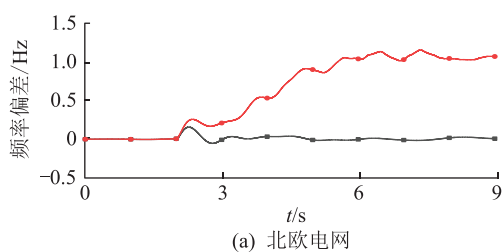


图 13 频率偏差对比

Fig.13 Frequency deviation comparison

5 结论

文中针对欧洲电网未来规划的需求,对直流电网在欧洲交流网背景下的特性进行了研究,得到如下结论:

(1) 在欧洲交流主网架上建立 51 端直流电网,交流网能承受大量的电力馈入和输出,保持电压稳定,并满足直流网 $N-1$ 故障下的频率稳定。

(2) 通过仿真研究得出,对于输出功率不稳定的换流站,采用附近站点下斜控制的方式比采用单一换流站定电压控制的方式更有利于直流电网的稳定。利用直流电网直流线路的互为冗余性,采用紧急功率支援策略,可在常规直流发生双极闭锁故障时,为功率缺额地区送入功率,为功率盈余地区输出功率,提高系统稳定性。

(3) 仿真结果表明,在欧洲交流电网上建立直流电网可以改善交流电网的稳定性和资源负荷逆向分布的问题,该方案可行有效。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京:中国电力出版社,2015.
LIU Zhenya. Journal of global energy interconnection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- [2] 刘高任,徐政,薛英林,等. 基于动态冗余度的模块化多电平换流器子模块投入策略[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2564-2571.
LIU Gaoren, XU Zheng, XUE Yinglin, et al. Optimized control strategy based on dynamic redundancy for modular multilevel converter[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2564-2571.
- [3] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,2016.
XU Zheng. Voltage source converter based HVDC power transmission systems[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [4] MARQUARDT R. Modular multilevel converter: an universal concept for HVDC-networks and extended DC-bus-applications [C]//Power Electronics Conference (IPEC). London, 2010: 502-507.
- [5] 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.
- [6] TU Q R, XU Z, CHANG Y, et al. Suppressing DC voltage ripples of MMC-HVDC under unbalanced grid conditions [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2012,27(3):1332-1338.
- [7] 陆晶晶,贺之渊,赵成勇,等. 直流输电网规划关键技术与展望[J]. 电力系统自动化,2019,43(2):182-191.
- LU Jingjing, HE Zhiyuan, ZHAO Chengyong, et al. Key technologies and prospects of HVDC transmission network planning [J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(2):182-191.
- [8] 欧盟正在计划连接所有 28 个成员国的超级电网[J]. 风能,2014(12):16.
- The EU is planning to connect the super grids of all 28 member states[J]. Wind Energy,2014(12):16.
- [9] 超级电网研究所为欧洲超级电网项目铺路[J]. 中国电力,2014,47(11):74.
- Supergrid institute paves the way for European supergrid projects[J]. Electric Power,2014,47(11):74.
- [10] 鲁宗相,蒋锦峰. 解读美国“Grid2030”电网远景设想[J]. 中国电力企业管理,2004(5):37-40.
- LU Zongxiang, JIANG Jinfeng. Interpretation of the vision of the US "Grid2030" power grid[J]. China Electric Power Enterprise Management,2004(5):37-40.
- [11] 杜晓磊,郭庆雷,吴延坤,等. 张北柔性直流电网示范工程控制系统架构及协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(9):164-173.
- DU Xiaolei, GUO Qinglei, WU Yankun, et al. Research on control system architecture and coordinated control strategy of Zhangbei flexible DC grid demonstration project [J]. Power System Protection and Control,2020,48(9):164-173.
- [12] DERAKHSHANFAR R, JONSSON T U, STEIGER U, et al. Hybrid HVDC breaker-a solution for future HVDC system [C]//Proc. CIGRÉ Session. Paris, France,2014:1-12.
- [13] 俞永杰,邓伟成,李帅,等. 采用双电流转移支路的直流电网故障清除策略[J/OL]. 高电压技术:1-10[2020-05-27]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20200507015>.
- YU Yongjie, DENG Weicheng, LI Shuai, et al. DC grid fault clearing strategy using dual current transfer branches[J/OL]. High Voltage Engineering: 1-10 [2020-05-27]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20200507015>.
- [14] 康保林,高亮,屈子程. 基于 MMC 的直流电网故障分析和保护方案研究[J/OL]. 电测与仪表:1-11[2020-05-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200317.1600.008.html>.
- KANG Baolin, GAO Liang, QU Zicheng. Research on fault analysis and protection scheme of DC power grid based on MMC [J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation: 1-11 [2020-05-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200317.1600.008.html>.
- [15] 姚良忠,鲁双杨,文劲宇,等. 含 DC-DC:变换器的直流电网拓扑结构及其运行控制[J]. 电力系统自动化,2016,40(11):80-86.
- YAO Liangzhong, LU Shuangyang, WEN Jinyu, et al. Topology and control of DC grid with DC-DC converters[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(11):80-86.
- [16] 徐政,张哲任,刘高任. 柔性直流输电网的电压控制原理研究[J]. 电力工程技术,2017,36(1):54-59.
- XU Zheng, ZHANG Zheren, LIU Gaoren. Research on voltage control principle of flexible DC transmission power grid[J]. Electric Power Engineering Technology,2017,36(1):54-59.
- [17] 徐殿国,刘瑜超,武健. 多端直流输电系统控制研究综述[J]. 电工技术学报,2015,30(17):1-12.
- XU Dianguo, LIU Yuchao, WU Jian. Review on control strategies of multi-terminal direct current transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(17):1-12.
- [18] 朱文欣. 全球能源互联网发展的法律制约和思考[D]. 天津:天津师范大学,2020.
- ZHU Wenxin. Legal restrictions and thoughts on the development of global energy Internet[D]. Tianjin:Tianjin Normal University,2020.
- [19] 全球能源互联网发展合作组织. 欧洲能源互联网研究与展望[M]. 北京:中国电力出版社,2019.
- Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization. European energy Internet research and prospects [M]. Beijing:China Electric Power Press,2019.
- [20] Monthly hourly load values[EB/OL]. [2020-05-27]. <https://www.entsoe.eu/data/power-stats/>, accessed 3 May 2020.
- [21] 方卜珣. 220 kV 电网网架结构差异化规划方法研究[D]. 上海:上海交通大学,2018.
- FANG Puxun. Research on differential planning method of 220 kV power grid structure [D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2018.
- [22] GridKit extract of ENTSO-E interactive map[EB/OL]. [2020-05-27]. <https://zenodo.org/record/55853#.XR0LxeszbDc>, accessed 3 October 2019.

作者简介:



叶敏芝

叶敏芝(1995),女,硕士在读,研究方向为交直流电力系统稳定分析与控制(E-mail:21810011@zju.edu.cn);

喻哲扬(1996),男,博士在读,研究方向为交直流电力系统建模、分析与控制技术;

徐政(1962),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为大规模交直流电力系统分析、直流输电与柔性交流输电、风力发电技术与风电场并网技术、电力谐波与电能质量。

$$L = \begin{bmatrix} 0.55 & 0.6 & 0.6 & 0.35 & 0.3 & 0.5 & 0.9 & 0.61 & 1 & 0.65 & 1.75 & 0.9 & 0.65 & 0.7 \\ 0.52 & 0.4 & 0.8 & 0.76 & 0.55 & 0.35 & 1.4 & 0.65 & 0.6 & 0.73 & 1.05 & 1.15 & 0.75 \\ 1.25 & 1.25 & 1.2 & 1.2 & 0.7 & 0.85 & 1.65 & 1.3 & 1.25 & 0.9 & 0.75 & 1.62 & 1.15 \\ 0.75 & 0.65 & 0.8 & 1.6 & 0.56 & 1.15 & 0.85 & 0.9 & 1.35 & 0.6 & 1.22 & 0.75 & 0.36 \end{bmatrix}^T \quad (A2)$$

表 A1 欧洲直流网架规划节点序列表
Table A1 Node sequence table of European DC grid planning

节点编号	节点名称	节点编号	节点名称	节点编号	节点名称	节点编号	节点名称	节点编号	节点名称
1	埃斯比约	7	杜伊斯堡	13	图卢兹	19	布加勒斯特	25	波尔图
2	哥本哈根	8	纽伦堡	14	里昂	20	哈斯克沃	26	格但斯克
3	霍赫海德	9	巴黎	15	米兰	21	雅典		
4	不莱梅	10	南锡	16	罗马	22	莱切		
5	柏林	11	慕尼黑	17	布达佩斯	23	里奥马约尔		
6	布鲁塞尔	12	南特	18	塞尔维亚	24	马德里		

$$w = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (A3)$$

表 A2 欧洲直流网具体站点及其功率设定
Table A2 Specific sites and power settings of European DC network

换流站编号	换流站地点	功率/MW	容量/(MV·A)	换流站编号	换流站地点	功率/MW	容量/(MV·A)
1	冰岛 1	4 500	5 000	27	不莱梅	-6 000	8 000
2	冰岛 2	4 500	5 000	28	纽伦堡	-6 000	8 000
3	法罗群岛	-1 000	1 500	29	柏林	-6 000	8 000
4	爱丁堡	-2 000	5 000	30	杜伊斯堡	-6 000	8 000
5	英格兰海上平台	-500	600	31	霍赫海德	-2 000	3 000
6	爱尔兰海上风电场	2 500	3 000	32	布鲁塞尔	-2 000	3 000
7	伦敦	-2 000	3 000	33	卑尔根海上风电场	6 000	8 000
8	爱尔兰	2 000	3 000	34	灵达尔风电场	5 000	8 000
9	巴黎	-6 000	8 000	35	松兹瓦尔风电场	4 000	5 000
10	南特	-6 000	8 000	36	哥本哈根风电场	5 000	5 000
11	图卢兹	-6 000	8 000	37	埃斯比约风电场	4 000	5 000
12	里昂	-6 000	8 000	38	瓦萨风电场	2 000	5 000
13	南锡	-6 000	8 000	39	赫尔辛基风电场	3 000	5 000
14	里奥马约尔	-1 500	3 000	40	拉脱维亚	3 000	5 000
15	波尔图	-1 500	3 000	41	格但斯克	-4 000	5 000
16	马德里	-4 000	5 000	42	布达佩斯	-1 000	3 000
17	摩洛哥新能源基地 1	3 000	5 000	43	布加勒斯特	-2 000	3 000
18	摩洛哥新能源基地 2	4 000	5 000	44	哈斯科沃	-1 000	3 000
19	阿尔及利亚光伏电站 1	8 000	10 000	45	塞尔维亚	-2 000	3 000
20	阿尔及利亚光伏电站 2	8 000	10 000	46	雅典	-2 000	3 000
21	突尼斯光伏电站	8 000	10 000	47	土耳其光伏电站	4 000	5 000
22	罗马	-4 000	5 000	48	埃及新能源基地	8 000	10 000
23	莱切	-4 000	5 000	49	哈萨克斯坦新能源基地 1	8 000	10 000
24	米兰	-4 000	5 000	50	哈萨克斯坦新能源基地 2	8 000	10 000
25	法兰克福		8 000	51	乌克兰	-4 000	5 000
26	慕尼黑	-6 000	8 000				

表 A3 受端换流站闭锁引起的频率跌落

Table A3 Frequency drop caused by the blocking of the receiving converter station

国家	受入直流容量/GW	装机容量/GW	占比/%	最大频率偏差/Hz
比利时	2	12	24	0.25
意大利	12	50	30	0.58
德国	30	92	21.8	0.41
西班牙	4	15	30	0.58
葡萄牙	3	12	42	0.47
法国	30	82	24.4	0.42
英国	4	50	16	0.31
匈牙利	1	6	50	0.3
塞尔维亚	2	8	37.5	0.46
罗马尼亚	2	11	27.3	0.46
荷兰	2	20	25	0.21
波兰	4	25	20	0.31

Planning and simulation research of European VSC-HVDC grid

YE Minzhi, YU Zheyang, XU Zheng

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The establishment of a global energy Internet is an important development direction for large-scale development of new energy and a high proportion of access to the grid. The feasibility and influence of the VSC-HVDC grid across the European AC system is analyzed in this paper. Firstly, the distribution of resource loads in Europe is sorted out, the location and the capacity of the DC converter stations is designed, and DC grid structure is built. Then, based on the electromechanical transient simulation software PSS/E, 51 terminals VSC-HVDC grid is built on the European AC grid. Finally, the stability of the AC grid and the response characteristics of DC grid under multiple scenarios are studied. The simulation results show that the planned VSC-HVDC grid can provide power support, reduce the impact of power fluctuations injected by the converter station, and improve the stability of the European power grid.

Keywords: VSC-HVDC grid; European grid; frequency stability; droop control; emergency power support

(编辑 方晶)