

混合三端直流输电系统在风火打捆并网中的应用及其控制策略

武家辉^{1,2}, 王海云^{1,2}, 王维庆^{1,2}, 张强^{1,2}

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 教育部可再生能源发电与并网控制工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 针对大规模风电外送可靠性问题, 提出风火打捆经混合三端直流输电并网系统拓扑结构并设计各换流器的控制策略。混合三端直流输电系统的发电端由两个自然换相(LCC)整流器组成, 受端由一个电压源型逆变器(VSC)与外电网相连。风电场群侧 LCC1 换流器采用定有功功率的控制策略, 可以追踪最大功率; 火电厂侧 LCC2 换流器采用定直流电流控制策略, 可以平抑风功率波动。受端换流站控制器 VSC 采用定直流电压和定无功功率控制策略, 能有效应对换流站侧交流系统短路故障和负荷突变等工况。仿真结果表明所提控制方案的有效性。这种输电模式能够综合利用常规直流输电和轻型直流输电各自的优点, 有效扩展常规风火打捆直流输电系统的适用范围。
关键词: 风火打捆; 直流输电; 混合多端直流系统; 换流站; 控制策略

A bundling system of wind-coal power plants and its control strategies based on hybrid MTDC transmissions

WU Jiahui^{1,2}, WANG Haiyun^{1,2}, WANG Weiqing^{1,2}, ZHANG Qiang^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. Engineering Research Center for Renewable Energy Generation & Grid Control, Urumqi 830047, China)

Abstract: The wind-thermal bundling system based on a hybrid three-terminal HVDC transmission and the control strategies for each converter are raised to deliver large scale wind power to load center. This hybrid MTDC system consists of two line-commutated converters (LCC) which are connected to sending side, and one voltage source converter (VSC) at the grid side. The LCC1 controller at the wind farm side is designed to control active power and track maximum power while the LCC2 controller at the thermal power plant side, which is in DC current control mode, can compensate power fluctuation. VSC controller at the receiving end is proposed to control DC bus voltage and reactive power so it can operate the fault at the AC bus and the local load mutation. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed control strategies. The proposed scheme combines advantages of both LCC and VSC HVDC systems and provides a new way to transmit long distance wind power to the main grid.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51267017), Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (No. 20126501130001), and National High-tech R & D Program of China (No. 2013AA050604).

Key words: wind-thermal bundling system; HVDC; hybrid MTDC; converter station; control strategy

中图分类号: TM77

文章编号: 1674-3415(2016)02-0049-07

0 引言

有效缓解我国能源供需矛盾, 减轻经济发展过程中所带来的环境问题, 大力发展清洁能源是一项

战略举措。2014年中国新增风电装机容量 23.351 GW, 同比增长 45%^[1], 创历史最高。目前国内风电基地多建于“三北”地区, 这些地区由于用电负荷不高, 系统规模小, 导致风电必须送到区域电网内, 甚至其他电网进行消纳。采用风火打捆直流外送^[2-3]是未来大规模能源基地外送的重要方式之一, 但同时也对输电技术提出了更严格的要求。

基金项目: 国家自然科学基金(51267017); 博士点专项基金(20126501130001); 国家 863 计划(2013AA050604)

传统直流输电技术(LCC-HVDC)虽然在大容量、远距离输电方面有优势^[4],但同时存在着换流器换相失败的缺陷^[5]。随着电力电子技术的发展,基于电压源换流器(VSC)的轻型直流输电技术(VSC-HVDC)能实现有功、无功独立传输;不存在换相失败^[6],甚至可以向无源网络供电等优点^[7],具有极大优势。VSC容量相对于传统换流器较小,但是随着更大单体容量、更高电压等级的模块化多电平换流器(MMC)的发展,柔性换流器的容量可以和传统换流器相比配^[8]。文献[9]提出基于储能技术的VSC-HVDC系统改善双馈机风电场的运行稳定性能力。但假使柔性直流输电系统发电端换流器由于故障退出运行,风电场将无法外送功率。因此多端直流输电系统(MTDC)能够实现多电源供电、多落点受电,是一种可供选择的有效互联模式。

为了获得最大的经济和技术效益,充分利用柔性换流器和传统换流器各自优点,文献[10]于1994年提出混合HVDC的设想。文献[11]设计了一种混合两端直流输电系统,该系统能充分发挥LCC与VSC技术成熟、成本低廉和调节性能良好的特点。文献[12]提出将VSC应用于一个混合双极直流输电系统受端,由此可以改善系统逆变侧的性能,降低换相失败的概率。但以上文献均是在双端系统中应用混合直流输电系统,如果通过并联或串联换流器的方式,将混合两端HVDC系统扩展为混合多端直流输电系统,必然可以有效扩展现有HVDC系统的功能。

综上所述,为了提高HVDC系统输电能力,拓展常规风火打捆直流输电的应用范围,本文在DIGSILENT软件中设计了一个混合三端风火打捆直流输电并网模型,并为每个换流器设计了相应的控制策略。详细分析了不同工况下系统送、受两端风功率波动、故障穿越、负荷突变等特性。研究结果验证了所建立系统可行性及其控制方案的有效性。

1 基于风火打捆直流输电系统结构

1.1 系统模型

远距离输电系统有两个特点:一是潮流方向单一,不需要考虑潮流反向问题;二是当受端系统某点发生短路故障时,可能引起多回直流线路同时发生换相失败,对系统的安全稳定性造成威胁^[13]。针对以上特点,本文设计了一个混合三端风火打捆经直流输电外送系统,如图1所示。在送端侧,风电场与火电厂分别与由两个串联组成的12脉波动换流器LCC1、LCC2相连。受端逆变站则采用电压源换流器VSC并入电网。风电场与火电厂捆绑为负荷中心供电,承担电力外送职能。

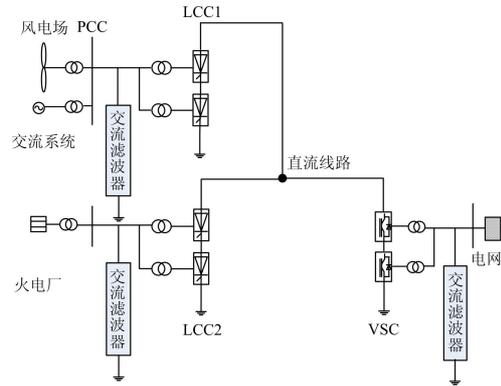


图1 混合三端风火打捆直流输电系统

Fig. 1 Bundling diagram of a hybrid MTDC system with three terminals

目前变速恒频技术是风电场的发展方向。变速恒频风力发电机组能实现电网频率和发电机转速的解耦,以此降低电网之间与风力发电的相互影响。特别是双馈机(DFIG),变频器容量较小,在经济上具有优势,不仅能实现有功与无功的解耦控制,而且改善了风力发电机组的运行特性,是风力发电设备的主要选择。因此,本文以双馈机的输出特性作为风电场群的输出特性,并以此研究与火电厂的协调特性。

火电机组可作为外送系统抵御严重故障扰动最重要的保证,因此在实际系统中,常规火电机组往往在风火打捆能源基地外送电源结构中占据较大的比例。在仿真中,规定火电机组的有功出力调节范围为50%~100%,最大容性无功出力为有功出力的50%,最大感性无功出力为有功出力的30%。本文为了克服三相短路和负荷骤变等工况,风火打捆的比例根据文献[14]设定为1:3.5。

1.2 风速模型

风速的间歇性和波动性造成了风电机组原动机功率的不可控性,这是风力发电机组不同于火电等传统发电机组最突出的地方。风速状况对风力发电系统的性能有着重要的影响,也使得风速模型成为风力发电系统仿真模型的重要部分。本文采用的风速模型是由阵风、随机风、渐变风三个分量叠加在平均风速上组成的组合风速模型。

(1) 阵风:描述风速突然变化的特性一般用阵风来表示,其数学模型为:

$$V_G = \begin{cases} 0 & t < T_1 \\ 0.5V_G \{1 - \cos(2\pi(t - T_1)/(T_2 - T_1))\} & T_1 \leq t \leq T_2 \\ 0 & t > T_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中, V_G , T_1 , T_2 分别为阵风风速(m/s)、起动时间(s)和终止时间(s)。

(2) 渐变风: 对风速的渐变特性可以用渐变风成分来表示, 其数学模型为:

$$V_R = \begin{cases} 0 & t < T_S \\ V_R (t - T_S) / T_r & T_S \leq t < T_S + T_r \\ V_R & T_S + T_r \leq t < T_e - T_d \\ V_R (T_e - t) / T_d & T_e - T_d \leq t < T_e \\ 0 & t \geq T_e \end{cases} \quad (2)$$

式中, V_R , T_S , T_e , T_r , T_d 分别表示渐变风风速(m/s)、起动时间(s)、终止时间(s)和风速从 0 到最大值的时间(s)以及风速从最大值到 0 的时间(s)。

(3) 随机风: 风速的随机性一般用随机噪声风分量来表示, 其数学模型为

$$S_V(\omega_i) = 2K_N F^2 |\omega_i| / \left\{ \pi^2 \left(1 + (F\omega_i / (\mu\pi))^2 \right)^{4/3} \right\} \quad (3)$$

$$V_S = 2 \sum_{i=1}^N \left(\sqrt{S_V(\omega_i)} \Delta\omega \cos(\omega_i t + \varphi_i) \right) \quad (4)$$

$$\omega_i = (i - 0.5) \Delta\omega \quad (5)$$

式中: K_N 是指地表粗糙系数; N 指频谱取样点; F 指扰动范围(m^2); μ 是相对高度的平均风速(m/s); $\Delta\omega$ 指各个频率段的频率数; φ_i 指 $0 \sim 2\pi$ 之间均匀分布的随机变量。

2 控制系统

混合多端直流输电系统的控制方法源于双端系统^[15]。本文采用单点电压控制法, 在并联 MTDC 输电系统中, 设定一个换流站为主导换流站, 控制系统直流电压保持稳定, 并维持整个 MTDC 系统的功率平衡, 其他换流站则按给定的电流(或功率)运行。本文选定 VSC 为主导换流站, 在 VSC 侧采用定直流电压、定无功功率控制方式, 以实现受端系统灵活控制。整流器 LCC1 控制并跟踪风电场发出的有功功率, 将其送至高压直流母线。当风速波动时, 会导致火电厂交流母线电压的波动, 因此火电厂侧整流器 LCC2 采用定电流控制, 保证系统电压频率和幅值的稳定。系统整体控制结构如图 2 所示。

2.1 送端 LCC 控制策略

送端 LCC-HVDC, 本文采用 CIGRE 标准测试模型的控制策略, 即正常情况下整流侧采用定直流电流(功率)控制策略, 为了避免各种工况引起的电流不稳定, 整流侧还配备了低压限流控制(VDCL)。

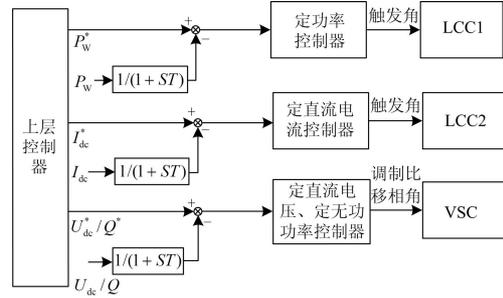


图 2 混合多端直流输电系统整体控制结构图

Fig. 2 Overall control structure of hybrid MTDC system

风电场侧整流器 LCC1 的控制是由内环定电流控制器和外环定功率控制器构成的双环控制, 见图 3。直流输电系统通常按预定的功率输送功率, 因此风电场用外环功率控制器精确控制直流功率, 并通过定电流调节器参与换流器触发角的调节。定电流控制环响应速度比定功率控制环路快, 直流系统发生扰动时, 电流环可以迅速限制暂态故障电流值以保护晶闸管换流阀。

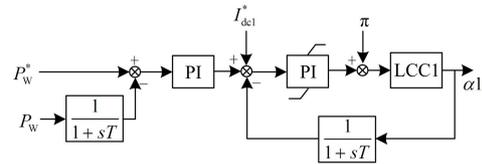


图 3 送端换流器 LCC1 双环控制方案

Fig. 3 Double-loop controller for wind farm side converter LCC1

火电厂侧整流器 LCC2 采用定直流电流的控制方式。当系统出现故障工况时, LCC2 侧配置低压限流控制器(VDCL)防止系统出现换相失败并改善故障后直流系统的恢复特性, 如图 4。在控制器设计上, LCC1 与 LCC2 均采用基于 PI 的一种复合控制器。其中 P_w / I_{dc2} 是风电场有功功率和火电厂侧的直流电流, P_w^* / I_{dc2}^* 是它们的参考值。

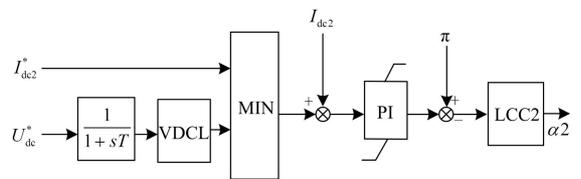


图 4 送端换流站 LCC2 控制方案

Fig. 4 Controller for thermal power plants side converter LCC2

2.2 受端 VSC 控制策略

电压源换流器 VSC 采用全控型开关器件构成的双桥式结构, 并采用 CIGRE 标准直流输电测试系统的逆变侧交流系统进行等效。其控制策略如图 5 所示, 由于电压源换流器具有两个自由控制变量, 可以独立控制系统的两个输出变量。本文选择直流

电压和无功功率作为控制目标。其中, U_{dc} 、 Q 分别代表系统直流电压和无功功率, U_{dc}^* 是直流电压参考值。分别将受端交流系统电流 d 轴分量参考值 I_d^* 与受端交流系统电流 d 轴分量实测值 i_d 以及受端交流系统电流 q 轴分量参考值 I_q^* 与受端交流系统电流 q 轴分量实测值 i_q 相比较, 将误差信号送入至 PI 控制器, 最终达到独立系统直流电压 U_{dc} 以及无功功率 Q 的目的。

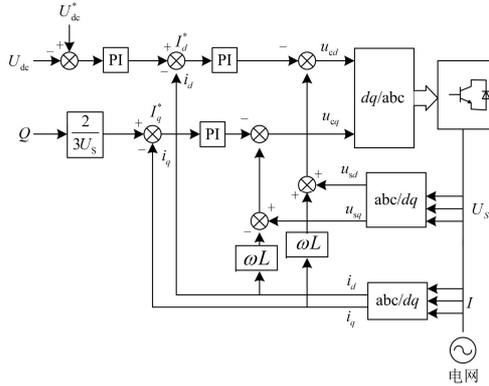


图 5 逆变(受端)换流站 VSC 控制方案

Fig. 5 Controller for the receiving end converter VSC

3 仿真

为了分析风火打捆经混合多端直流并网在不同运行条件下送端和受端的响应过程, 验证所提出的混合多端直流系统控制策略的有效性, 本文在 DigSILENT 中所建立算例具体数据如下:

风电场由 30 个单机容量 2 MW 且额定电压为 0.69 kV 的双馈风力发电机组成, 总装机容量为 60 MW。风电场群通过两级升压变压器连接至混合 MTDC 系统 LCC1 换流站, 因此, LCC1 换流站的容量设计为 60 MW。常规火电厂设计容量为 220 MW, 相应的 LCC2 的额定功率为 220 MW。受端换流站 VSC 额定容量设计为 300 MW。火电厂与风电场打捆通过一条直流电缆传送至外电网。系统简化图如图 6 所示。

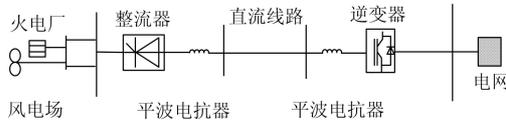


图 6 系统简化图

Fig. 6 Simplified diagram of simulation circuit

3.1 风电场功率波动工况验证仿真

图 7 为 20 s 内, 式(1)一式(5)叠加在基本风速为 11 m/s 的噪声风波动的情况, 系统响应过程如图 8 所示。

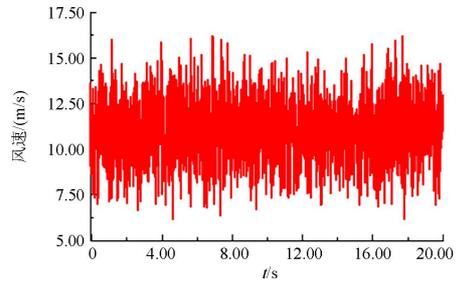
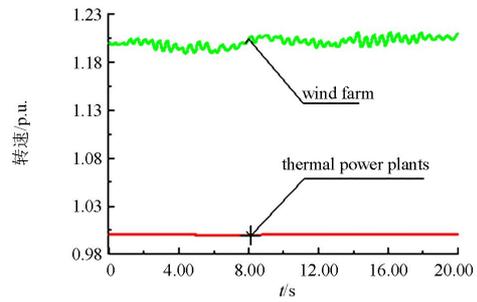
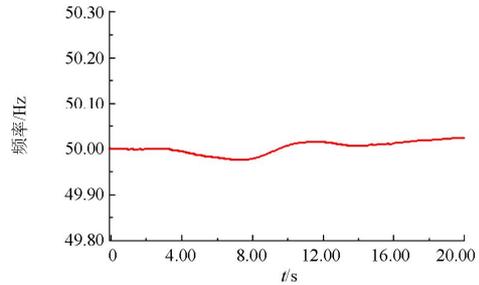


图 7 风速波动情况

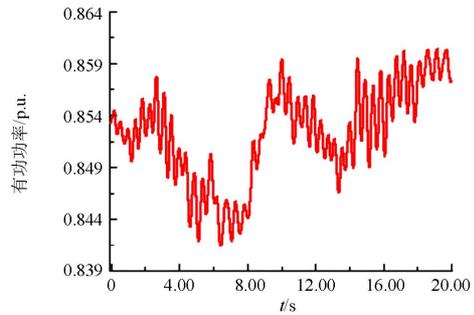
Fig.7 Variation of wind



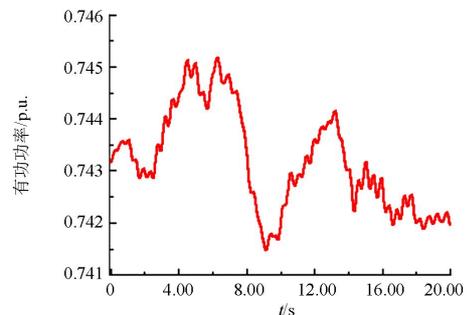
(a) 风、火电厂群等效机组转速



(b) 风电场母线频率



(c) 风电场输出有功功率



(d) 火电厂输出有功功率

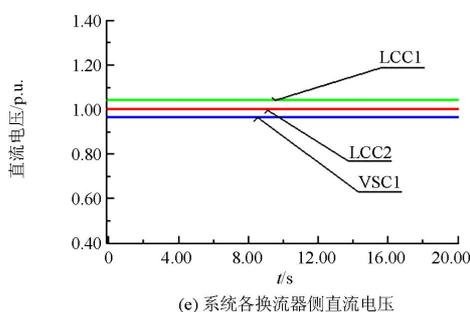


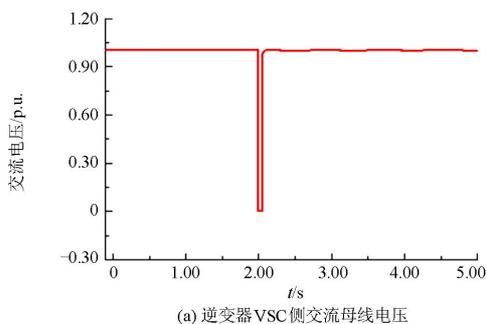
图 8 风功率波动时系统响应过程

Fig. 8 System response during wind power variation

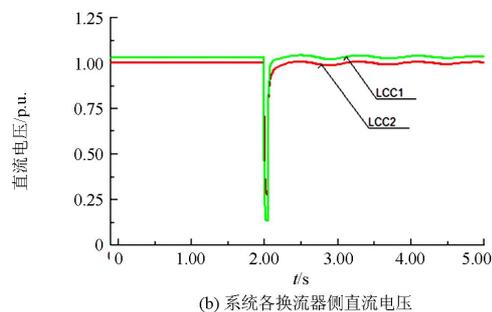
本文采用的双馈风力机, 当风电场内风速频繁波动时, 双馈机转速基本维持在 1.2 p.u., 频率在 50 Hz, 上下波动不超过 $\pm(2\% \sim 5\%)$ 。火电厂转速维持在 1.0 p.u., 见图 8(a)、图 8(b)。通过对转子侧变频器控制使输出风电功率维持在定值 0.85 p.u. 附近。相应的, 常规火电厂侧功率随风功率而反向变化, 见图 8(c)、图 8(d)。图 8(e)说明系统换流侧的直流电压值基本维持在额定值附近, 风功率波动不会对直流系统电压稳定性造成影响。调节火电厂侧换流器的有功出力可以平抑风功率波动, 系统响应波形验证了所建立模型的有效性。

3.2 换流站 VSC 侧交流母线侧发生三相短路故障

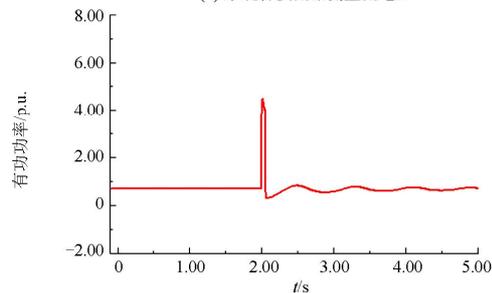
为了验证本文提出的受端交流系统故障, 逆变器站不存在换相失败的观点, 设定 2 s 时在逆变器 VSC 交流母线侧发生持续 0.1 s 的三相短路故障。系统响应如图 9 所示。故障发生后, 图 9(a)逆变侧换流器 VSC 交流母线降低至 0, 导致图 9(b)整流侧换流器直流电压的降低, 但不为 0。由图 9(c)、图 9(d)可以看出火电厂换流器发出的有功功率从 0.74 p.u. 上升至 4.6 p.u. 进行紧急功率支撑, 同时风电场侧有功功率几乎降为 0。一般情况下若风电场交流接入配电网中, 系统发生大扰动时, 并网风电场会发生失稳及风电机转子失速的现象。但本文采用的混合直流输电使得风电场机组转子电流只有较小影响, 见图 8(e), 切除故障能迅速恢复之前的稳定运行状态。



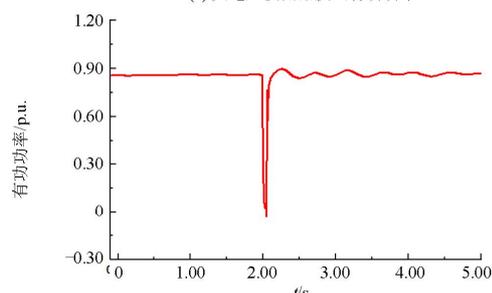
(a) 逆变器 VSC 侧交流母线电压



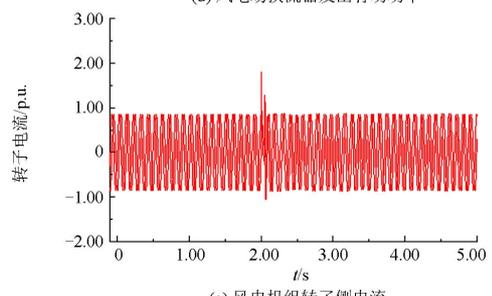
(b) 系统各换流器侧直流电压



(c) 火电厂换流器发出有功功率



(d) 风电场换流器发出有功功率



(e) 风电机组转子侧电流

图 9 受端站 VSC 交流侧故障系统响应

Fig. 9 System response during AC fault at VSC side

3.3 负荷骤变对系统的影响

并网时发生负荷突变会影响电场和电网之间的功率交换, 引起风电场母线和地区电网母线电压的波动。本节交流系统处的负荷采用静态负荷模型, 其 $P=300$ MW, $Q=60$ Mvar。设定在 2 s 时负荷骤减 30%, 0.5 s 后恢复。负荷骤减削弱系统有功功率需求, 引起 VSC 侧直流电压升高, 但是由于 VSC 的直流电压控制策略使得其余端口电压只有微小变化, 不存在换相失败的问题, 见图 10(a)、图 10(b)。火电厂发出的有功功率减少了 0.2 p.u., 同时风电场

只减少了 0.05 p.u., 见图10(c)。由图10(d)可以看出风电场群侧等效转速保持在 1.2 p.u.附近, 这说明负荷骤变扰动主要由火力发电机组来消除, 风电场基本不承担负荷扰动的不利影响, 充分体现了风火打捆的优越性, 有利于系统的稳定运行。

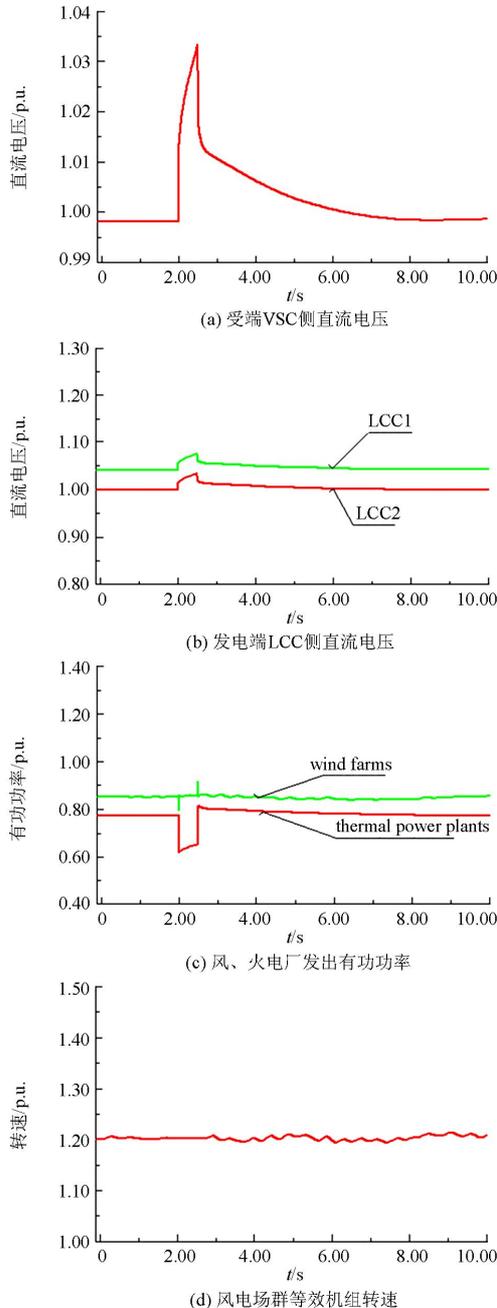


图 10 负荷骤变对系统响应

Fig. 10 System response during load changes

4 结语

本文探讨了混合多端直流输电技术用于风火打捆输电并网的可能性。通过分析系统送、受两端风

功率波动、故障穿越、负荷突变等特性可以得出以下结论与展望:

(1) 当风火打捆外送系统送端发生风速频繁波动扰动时, 通过火电厂及混合直流输电系统可以削弱风速波动带来的不利影响, 保证输入至受端电网交流系统的电压稳定。

(2) 当风火打捆外送系统受端电网交流母线发生三相短路或者负荷突变时, 该系统受端柔性换流器 VSC 的定电压控制模式能够保证电网受干扰后的稳定, 使得风电场、火电厂均能“穿越”故障, 运行状况基本不受电网受端故障影响。

(3) 火电厂调峰能力有限, 文中火电的调节响应速度难以完全满足风电波动功率实时调节的需求, 下一步作者准备在受端加上储能装置对所建系统进行进一步优化。

(4) 由于 VSC 的容量相对较小, 因此拉低了整个混合直流输电系统的容量。但是随着电力电子的发展, 在不远的将来, 柔性直流输电也会采用特高压电压等级, 其输送容量会与传统特高压直流输电相当。

参考文献

[1] Global Wind Energy Council. Global wind report 2014[R]. Brussels: Global Wind Energy Council, 2014.

[2] 李生福, 张爱玲, 李少华, 等. “风火打捆”交直流外送系统的暂态稳定控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 43(1): 108-114.

LI Shengfu, ZHANG Ailing, LI Shaohua, et al. Study on transient stability control for wind-thermal-bundled power transmitted by AC/DC system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 43(1): 108-114.

[3] 徐式蕴, 吴萍, 赵兵, 等. 提升风火打捆哈郑特高压直流风电消纳能力的安全稳定控制措施研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(13): 92-99.

XU Shiyun, WU Ping, ZHAO Bing, et al. Study on the security and stability control strategy enhancing the wind power consuming ability of the wind-thermal power combining Hazheng UHVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(13): 92-99.

[4] 李广磊, 李笋, 孙树敏, 等. 基于 STATCOM 和 LCC-MTDC 技术的大规模风电并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 32-39.

LI Guanglei, LI Sun, SUN Shumin, et al. Research on LCC-MTDC and STATCOM technology for wind farms integration[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 32-39.

[5] 常勇, 徐政, 郑玉平. 大型风电场接入方式的仿真比

- 较[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 70-75.
CHANG Yong, XU Zheng, ZHENG Yuping. A comparison of the integration types of large wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(14): 70-75.
- [6] 黄晟, 王辉, 廖武, 等. 基于 VSC-HVDC 串并联拓扑结构风电场协调控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 155-162.
HUANG Sheng, WANG Hui, LIAO Wu, et al. The coordinated control strategy based on VSC-HVDC series-parallel topology in wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 155-162.
- [7] 梁营玉, 张涛, 刘建政, 等. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 模型预测控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 78-89.
LIANG Yingyu, ZHANG Tao, LIU Jianzheng, et al. Model predictive control for VSC-HVDC supplying passive networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 78-89.
- [8] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [9] 饶成诚, 王海云, 王维庆, 等. 基于储能装置的柔性直流输电技术提高大规模风电系统稳定运行能力的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 1-7.
RAO Chengcheng, WANG Haiyun, WANG Weiqing, et al. Enhancement of the stable operation ability of large-scale wind power system based on the VSC-HVDC embedded in energy storage apparatus[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 1-7.
- [10] ZHAO Z, IRAVANI M R. Application of GTO voltage source inverter in a hybrid HVDC link[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(1): 369-377.
- [11] 李光凯, 李庚银, 梁海峰, 等. 新型混合直流输电方式的研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 77-81.
LI Guangkai, LI Gengyin, LIANG Haifeng, et al. Research on a novel hybrid HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 77-81.
- [12] ZHAO Chengyong, SUN Ying. Study on control strategies to improve the stability of multi-infeed HVDC systems applying VSC-HVDC[C] // Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, May, 2006: 2253-2257.
- [13] 陈干, 田方, 刘宁, 等. 高压直流输电工程换相失败研究[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 136-140, 147.
CHEN Gan, TIAN Fang, LIU Ning, et al. Research on HVDC transmission project commutation failure[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 136-140, 147.
- [14] 华文, 徐政. 风电火电打捆送出时的输电容量优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 121-125.
HUA Wen, XU Zheng. A method to optimize transmission capacity of wind power in combination with thermal power[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 121-125.
- [15] 易荣, 岳伟, 张海涛, 等. 多端柔性直流输电系统中混合运行方式分析[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(12): 21-26.
YI Rong, YUE Wei, ZHANG Haitao, et al. Analysis on mixture operation mode of VSC-MTDC transmission system[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(12): 21-26.

收稿日期: 2015-04-08; 修回日期: 2015-08-01

作者简介:

武家辉(1988-), 女, 博士研究生, 研究方向为风火打捆直流输电与并网技术; E-mail: wjha29@sina.com

王海云(1973-), 女, 硕导, 研究方向为可再生能源发电与并网技术; E-mail: 327028229@qq.com

王维庆(1959-), 男, 博导, 研究方向为电力系统自动化和风电机组智能控制。E-mail: wwq59@xju.edu.cn

(编辑 周金梅)