

含大规模风光功率汇集的多端柔性直流系统分析

周登钰¹, 张新燕¹, 赵理飞², 赵理威³, 孙 凯¹, 时思思¹

(1. 新疆大学电气工程学院, 乌鲁木齐 830047; 2. 国网奎屯供电公司, 奎屯 833200; 3. 国网昌吉供电公司, 昌吉 831100)

摘 要: 针对中国东北、西北、华北地区形成的区域性大规模风光基地功率外送受限问题,提出一种用于大规模风光功率汇集的树枝式多端柔性直流系统(voltage source converter based multi-terminal DC, VSC-MTDC)。通过对区域性能源基地的分布形态分析研究,设计含风光基地的树枝式五端柔性直流系统,实现风光基地的能源汇集;并设计送受端换流站的控制策略,实现风光功率的波动和风光功率的协调分配。最后通过 DIgSILENT 建模仿真,验证设计系统的稳定性和控制策略的有效性。

关键词: 新能源; 多端柔性直流输电系统; 控制策略; 建模仿真

中图分类号: TM712

文献标志码: A

0 引 言

由于我国能源的逆向分布,形成东北、西北、华北地区(后文简称三北地区)和内蒙古西部地区(后文简称蒙西地区)等新能源聚集区域,而能源负荷中心在中东部地区,负荷分布相差较大。能源供需不匹配,导致“三北”、蒙西等区域的能源外送困难,消纳问题严重。柔性直流输电(VSC-HVDC)技术能够较好地稳定风电、光伏接入电网时的电压,避免因风电、光伏的波动性造成的脱网运行问题,同时也增强了风电、光伏的灵活接入,因此通过 VSC-HVDC 系统来输送新能源汇集地区的风、光能源,提高新能源的消纳,减少电力市场电能过剩和弥补用电市场电力不足,对全国资源分配优化,是实现新能源的持续发展、可靠利用的重要举措^[1-2],尤其是“三北”、蒙西地区新能源外送的方案。

针对“三北”、蒙西地区能源基地多点分布的形态以及长距离交流输电较直流输电功率损失大、输电量少、成本高等问题,提出通过 VSC 多端直流汇集风光功率,再通过传统高压直流输电通道联合火电实现跨省功率外送。文献[3]介绍了多端直流系统的不同控制策略,适用于城市直流电网,是否可应用于风光并网有待验证。文献[4]设计了多端直流系统的不同拓扑结构,并进行建模仿真。文献[5-10]研究了风电场直流并

网的拓扑结构和控制策略。文献[11]研究了一种适用风电并网的环形六端直流系统,该系统在交流系统较强的情况下较稳定,但不适合三北荒芜地区。文献[12]研究了大型风电基地功率外送的多端直流系统控制策略,该拓扑结构太过简化,无法表征复杂系统的运行特性。本文在上述研究的基础上针对三北地区的区域性能源分布形态,设计适用于大规模风光功率的树枝式五端柔性直流系统,并设计系统的控制策略,然后通过 DIgSILENT 建模仿真系统的运行特性,主要分析风光功率波动、风光电站退出并网和风电场故障对系统的影响。

1 系统概述

图 1 为三北、蒙西等区域的大规模风光基地的特殊分布形式,其分布特点本身存在系统较弱、送电受限的问题。近年随着国家加大新能源的开发力度,各地区风电、光伏电站的数量成指数级增加,给当地电网调峰带来巨大的挑战,致使其消纳问题日益突出严重。而当地供热电厂、自备电厂盲目扩建,不但不利于吸收新能源,反而加剧了地区电网的调峰困难,加大了弃电量。通过调研三北地区的区域性新能源基地,考虑围绕特高压直流送端中心建立放射状或环网型多端柔性直流系统。而大部分的风电基地沿山脉分布、光伏基地分布在戈壁滩或沙漠,建立多端树枝型柔性直流系

收稿日期: 2017-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(51367015; 51667018)

通信作者: 张新燕(1964—), 女, 博士、教授、博士研究生导师, 从事新能源发电控制与并网技术方面的研究。xjcxzy@126.com

统能更便于共用直流输电通道,采纳此方案节省成本,更加经济。

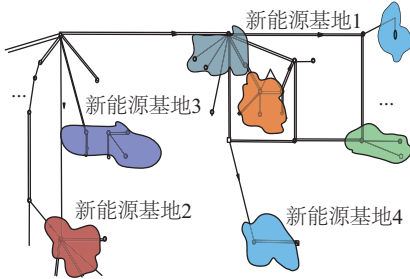


图1 新能源集中化区域分布

Fig. 1 Regional distribution of new energy concentration

如图2所示为含风光基地的典型五端树枝型柔性直流系统,该系统包含有共用直流通道、共用换流站母线、公共受端的拓扑结构。系统将4个风光基地的功率汇集,在公共受端再集中通过传统高压直流通道跨省输电。此系统为未来三北地区的典型风光功率汇集形式,风光基地的电功率汇集后输往内地负荷中心,在公共受端会有大型直流火电机组,用于风光功率的峰谷平抑和电压频率调控。

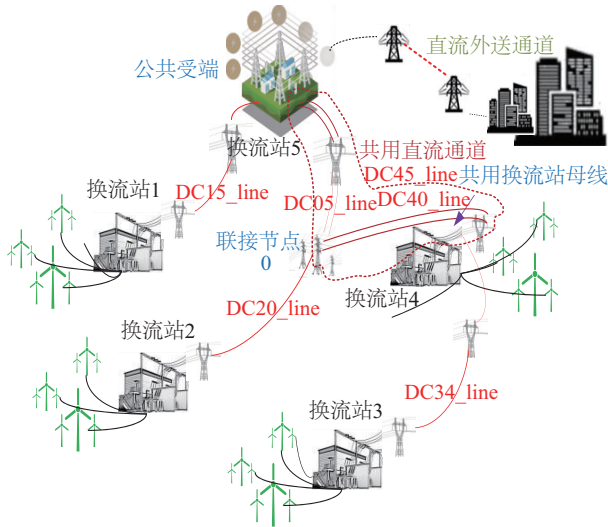


图2 大规模风电集群的五端树枝型柔性直流系统

Fig. 2 Five terminal branches of flexible DC system of large-scale wind power cluster

2 控制策略分析

2.1 多端柔性直流受端换流站控制策略

多端柔性直流系统电网侧为有源交流网络,通常采用定直流电压控制的方式。电压的稳定直接影响系统的稳定,在电压出现较大波动时换流站就会保护动

作,波动幅度较大,情况较严重的就会直接导致系统瘫痪不能正常工作。该多端柔性直流系统的受端换流站采用定直流电压控制,受端电网侧需配置一定容量的直流火电机组,根据特高压直流通道的风火打捆比例来提供或吸收系统的风电功率缺额,以平衡直流系统的功率波动。相反,当公共交流系统出现功率波动或电压跌落时,多端柔性直流系统也可对本地电网提供紧急功率支援或电压支撑。

VSC 电网侧换流站外环采用定直流电压控制并加入定无功功率控制,能实现对有功电流和无功电流的同时控制。通过将有功、无功电流解耦,分别由 d 轴和 q 轴电流表示。 d 轴电流的控制目标是直流电压, q 轴电流的控制目标是经 PI 控制环节的下垂电压或经 PI 控制环节的无功功率。在正常运行时,电流限制器优先对 d 轴电流进行控制,限制 q 轴电流起调控作用。但发生故障时,内环电流控制器限流,通过优先对 q 轴电流进行控制,限制 d 轴电流发挥作用来平衡电网的功率平衡与稳定性。通过有功功率的补偿量调整 u_{dref} 的整定值,与实际直流电压相减得到直流电压的偏差量,经 PI 控制器调节后得到 i_{dref} ,定直流电压控制策略见图3。

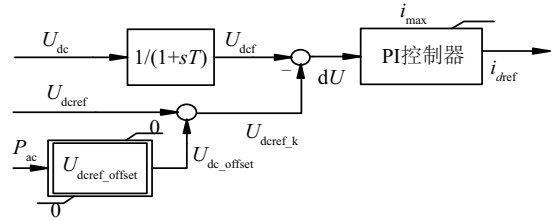


图3 定直流电压控制

Fig. 3 Constant DC voltage control

I_q 由模式开关基于 U_{ac} 与 Q_s 进行调节。 U_{ac} 的自偏差由 PI 进行调节,与 u_{acref} 形成新的偏差量,同时无功功率的自偏差由 PI 调节,与 Q_{ref} (负)叠加,经下垂控制输出,模式开关对 2 个输入量进行选择,得到 I_{qref} 。控制策略图见 4。

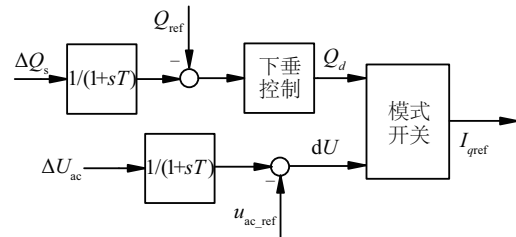


图4 内环电压下垂和无功功率控制

Fig. 4 Inner loop voltage sag and reactive power control

斩波器控制是将换流站的阴阳极直流电压作为输入信号,设置斩波器触发的上下限值,根据输入电压的大小来决定触发器的工作状态。在输入电压超过设置上限阈值时就会触发直流侧的斩波器电阻,在输入电压低于下限阈值时,直流侧将被限制。在网侧发生故障,电压超过上限阈值,此时由于触发斩波器电阻,电网注入交流网络的功率受阻,变流器的 IGBT 阀将有可能受损。如图 5 所示,为了预防电网侧故障对换流阀的危害,配备斩波器控制。 U_{dc0} 为斩波器动作前的直流电压,发生故障时,通过直流电压偏差来确定受端故障程度及斩波角的上下限,通过换流阀动作与斩波角控制,阻止直流侧故障引起的直流电压波动及直流侧电容过充电。

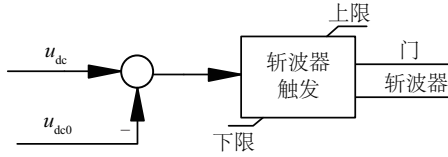


图5 斩波器控制

Fig. 5 Chopper control

2.2 多端柔性直流受端换流站控制策略

对处于风电场侧的换流站采用的控制方式一般是恒压恒频控制,风电场出口的电压频率是根据换流站设定值变化的,设定值不变,则频率是不会因为风功率的波动而发生变化。直流系统的不平衡功率会影响交流系统频率,间接反馈到风电机组的控制器中,风电场调整有功功率出力。风电机组的转子转动动能变化量可表示为:

$$\Delta E_k = 4\pi\Delta\bar{f}HS_N \quad (1)$$

式中, $\Delta\bar{f}$ ——电场交流频率变化量的标么值; H ——惯性时间常数; S_N ——风电场发电容量。

直流输电中的直流电容用于平衡功率,当直流系统电压出现波动,直流系统整流和逆变侧功率出现不平衡,此时直流侧电容发挥作用,电容存储能量的变化量为:

$$\Delta E = \frac{1}{2}C\pi(U_{dc}^2 - U_{dc0}^2) \quad (2)$$

式中, C ——系统直流侧电容; U_{dc} ——系统扰动后的直流电压; U_{dc0} ——系统扰动前的直流电压。

由式(2)可推导出风电场交流频率的变化量与系统直流电压的关系为:

$$\Delta\bar{f} = \frac{C(U_{dc}^2 - U_{dc0}^2)}{8\pi HS_N} \quad (3)$$

由于风电场输出功率受交流网络频率的影响很

小,几乎可以不考虑,所以在风电场与所接的交流网络没有彼此之间频率与有功功率耦合。波动的风电功率接入柔性直流系统,也不会对系统的频率和电压稳定造成影响。VSC 风电场控制器属于无源并网,通过定交流电压控制并配合定相角控制。因为无交流网络的支撑,所以控制器必须建立风电场侧网络电压,也就是保持交流侧网络的电压频率、幅值和角度保持恒定,换流站控制的给定量为 d 轴电压给定 dU^* 、 q 轴电压给定 qU^* 和同步旋转角度 θ^* ,即可控制风电场侧公共连接点电压的幅值、相位和频率,而电网潮流的有功功率与无功功率就不能被控制。通过测量风电场侧交流电压与直流电压求比得到调制系数 P_m ,并与变流器频率 f_0 同为控制目标对变流器进行控制。控制策略如图 6 和图 7 所示。

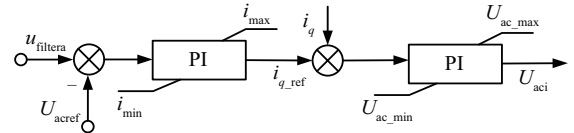


图6 定交流电压控制

Fig. 6 Constant AC voltage control

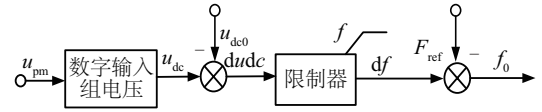


图7 频率控制策略

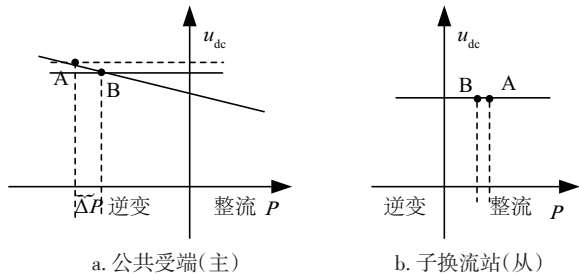
Fig. 7 Frequency control strategy

风电场能发出一定无功功率,其有功功率基本不受电网频率变化的影响,当换流站在给定的电压幅值和频率下,如同无穷大电源一样。送端换流站的参考频率 f 在稳态下保持恒定,风电场汇流母线的交流电压由换流站外环电压环节控制,风电场发生风功率波动时,系统也不会受到较大影响,并可通过增加无功功率来稳定交流系统电压。

2.3 多端直流换流站间协调控制策略

多端柔性直流系统运行过程中,单一主站控制是一种系统中受端换流站通过控制直流电压承担系统所有功率波动的一种控制。系统有公共受端换流站作为主站,采用电压斜率控制,当有功功率发生改变时,经 PI 调制,系统运动到新的平衡点,而风电场各换流子站,采用定交流电压控制,当系统功率变动时,为了维持直流电压,通过增加无功功率来间接稳定直流电压。如图 8 所示,为各换流站间的协调控制 $P-V$ 特性曲线。系统受端换流站通常工作在电压斜率控制模式下来控制多端系统的直流电压,并承担少量不平衡功

率。因此,应设置合适的 P - V 特性曲线,改变其斜率系数,使其在允许功率波动范围内,并保证功率波动时系统的直流电压几乎不变。



a. 公共受端(主) b. 子换流站(从)

图8 多端柔性直流的换流站协调控制

Fig. 8 Coordinated control of multi terminal flexible DC converter station

3 案例准静态潮流计算

本文研究的五端柔性直流系统,风电场由双馈风电机组成,光伏电站基于静态发电机建模,其中各换流站间的直流线路均为 100 km,风光电站到换流站的距离忽略不计。系统设备参数如表 1 所示。该系统的潮流最终馈入受端换流站,其中 DC_45line 直流线路为多个风光基地的公共直流通道,0 节点为 3 条直流通道的公共联接点,VSC3 直流通道直接联接到 VSC4 的直流母线上。系统的潮流分布如图 9 所示。

表1 系统设备参数表

Table 1 System device parameter table

设备	参数	VSC5	VSC1	VSC2-4
换流站	交流电压/kV	320	110	110
	无功补偿/Mvar	900	360	180
	额定功率/MW	1000	400	200
直流线路	电压等级/kV	±150	±150	±150

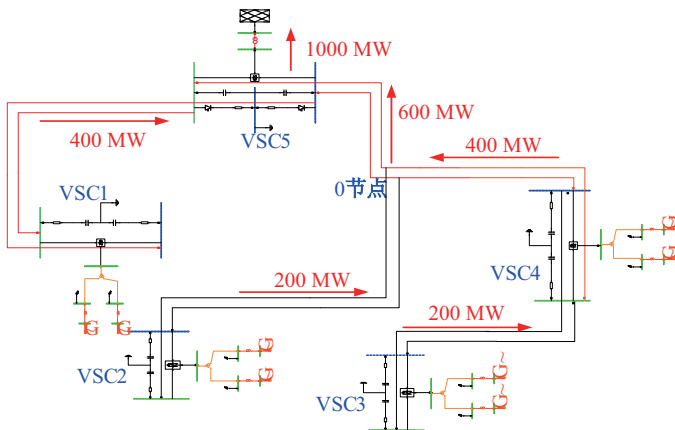


图9 系统潮流分布图

Fig. 9 Power flow diagram of system

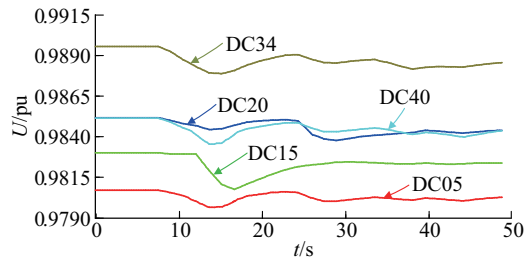
一般考虑风速因素对系统的影响要建立双参数和三参数的威布尔^[13]分布的风速模型,由于三北地区地理位置和风场排布较为复杂,建立此模型较为困难且对本文的研究影响不大,因此本文不考虑其风场内部结构的影响,只根据不同区域性风电场的风速、出力不同制定变功率的准静态仿真,仿真时间为 60 s。表 2 为 4 个不同风电场的随风速变化的出力情况。以风光基地 1 为例,该地的风电场在 12 s 时风速降至 8.1 m/s,16 s 恢复到 11.0 m/s,风速发生改变即表示新的风速,风速不变以“—”来表示。光伏电站的功率波动与风电场类似,不再赘述。

表2 风电基地的时序风速变化

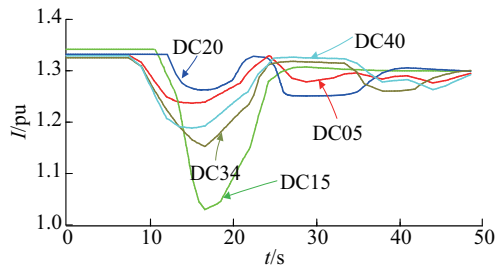
Table 2 Wind speed variation of wind power base

基地 序号	时间/s						
	8	12	16	24	28	34	44
1	—	8.1	11.0	—	—	—	—
2	—	—	—	9.0	11.0	—	—
3	9.8	—	11.0	—	—	9.9	—
4	10.2	11.0	—	—	—	—	11.0

系统在短时风速发生改变时,风电场出力波动,在 12 s 时刻风速下降,风电场出力减少,有功功率下降如图 10d 所示,相应的电压电流出现波动如图 10a 和图 10b 所示,系统采用定直流电压控制,进行无功补偿稳定直流电压、电流使风电场不发生风电机组脱网情况,到 16 s 时刻风速恢复,经过一段稳态的调节过程系统恢复稳定运行,如图 10c 所示。新能源出力波动性较大,对输电系统的电压、电流稳定性有较大影响,本文设



a. 风电场输电线路电压时序波动



b. 风电场输电线路电流时序波动

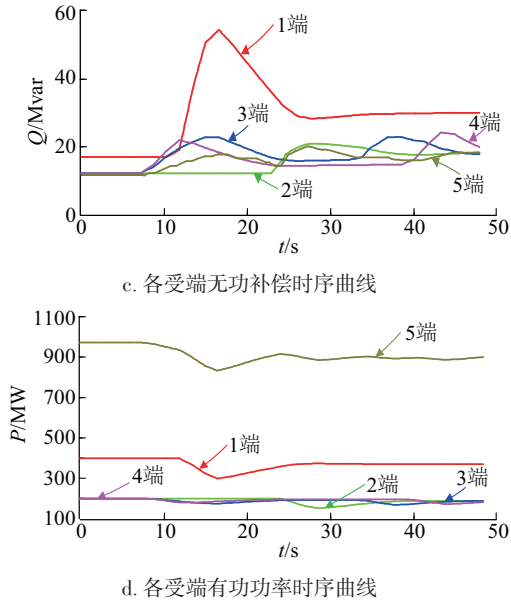


图10 不同风速的风电场动态特性

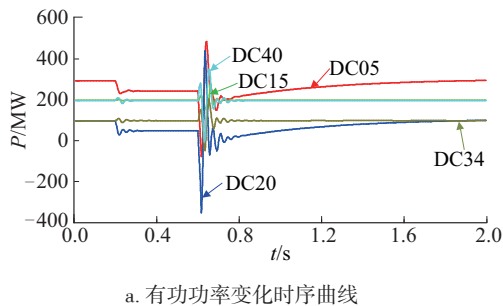
Fig. 10 Dynamic characteristics of wind farms with different wind speeds

计的控制策略通过仿真可知,可有效控制因风速波动引起的电压功率波动。

4 案例故障扰动仿真分析

4.1 风电场脱网和并网仿真

风电基地2的直流通道与其他直流通道的联接位置,潮流走向复杂,本文假定风电基地2的某100 MW风电场(20台 \times 5 MW,双馈风电机组)在0.2 s时脱网,持续0.6 s后再重新并网,研究风电场的脱网和并网对整个系统的暂态影响。如图11a所示,0.2 s时刻风电场脱网,系统外送有功功率出现大量缺额,导致直流电压猛然下降,直流电流也随之出现大幅波动(如图11b和图11c所示),此时换流站两侧交流系统也出现不稳定有功功率,将产生波动的直流电压,有功电流不平衡将向换流站电容充电,在逆变侧采用定直流电压控制,通过调节直流电压,来平衡电网功率,提高系统的稳定性。



a. 有功功率变化时序曲线

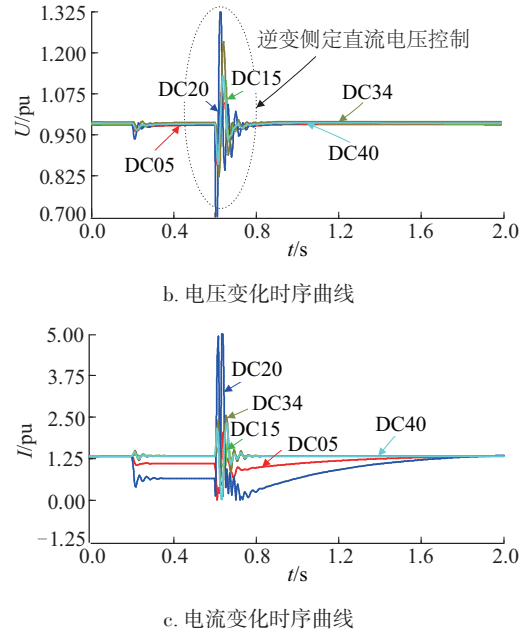


图11 脱网并网前后系统动态特性

Fig. 11 Dynamic characteristics of system before and after grid-connected

4.2 故障扰动仿真

风光基地4所在的直流换流母线的位置联接不同直流通道,拓扑复杂,考虑在风光基地的公共连接点汇流母线处设置三相短路故障来研究系统的暂态特性。故障时序为:0 s时风电场公共连接点母线发生三相短路故障,故障持续0.3 s,然后清除故障,1 s仿真结束。0 s发生故障后,直流通道的出力发生改变,风光功率外送通道受阻,输出功率下降(如图12a所示),多端柔性直流系统交流电网故障将导致系统的直流电压振荡,当直流系统的电压超出多端柔性直流系统稳定运行的限定范围,电场侧换流站通过测量风电机组的电压频率将频率变化的信息间接反馈到风电机组中,通过双馈风电机组转子变流器的调节降功率运行来平衡系统的功率波动,送侧换流站变为恒压变频控制。故障持续到0.4 s时完全清除,双馈风电机组转子变流器全功率运行,直流电压被控制在允许的5%之内(如图12b所示),恢复稳态时VSC1作为主站工作在定直流电压控制模式;VSC2、VSC3、VSC4工作在定有功功率模式。如果换流主站产生故障时,系统中发生不同程度的功率缺损(如图12c、图12d所示)。

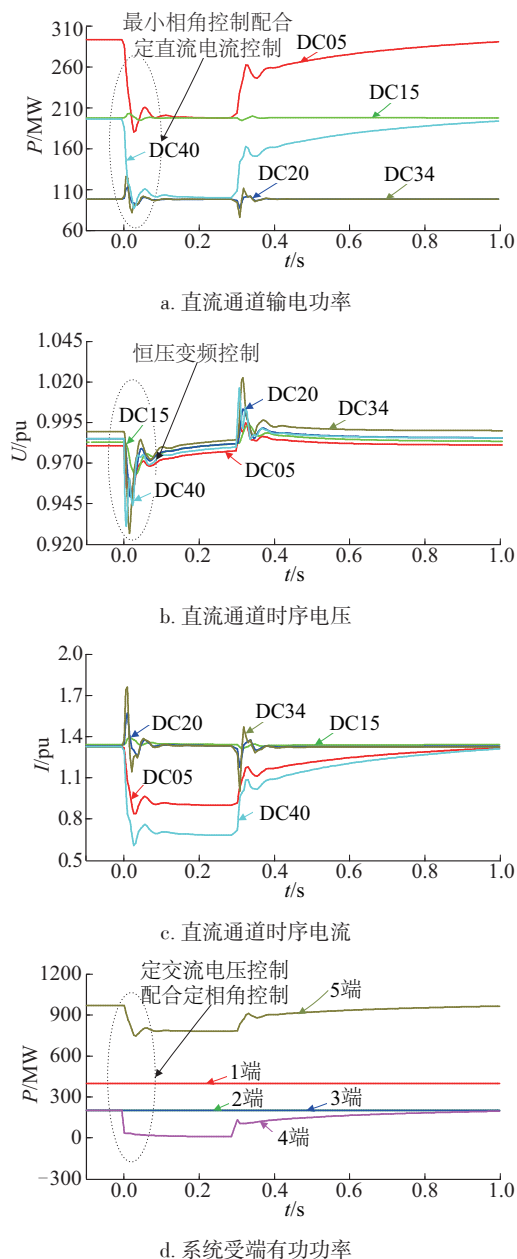


图 12 系统故障时的动态特性

Fig. 12 Dynamic characteristics of system failures

5 结 论

本文提出一种用于大规模风光功率汇集的树枝式多端柔性直流系统,并设计送受端换流站的控制策略,通过对五端柔性直流系统进行准静态潮流计算、变功率的准静态仿真、风电场脱网和并网故障扰动的暂态仿真,验证了此系统的稳定性和控制策略的有效性,得出以下主要结论:

1)通过 DIgSILENT 仿真分析可知,含风光能源的

多端树枝式柔性直流系统,能够很好地适用于风电基地沿山脉分布、光伏基地沿戈壁滩或沙漠分布的三北地区,具有较强的稳定性。

2)当风光基地发生功率波动时,系统各节点电压波动不大,维持在 1.0 pu 附近,但功率波动增加了系统的无功补偿。

3)风光基地的风电场脱网对系统的影响不大,但风电场并网造成的不平衡潮流是正常时的 1~2 倍,严重影响系统的电压电流稳定。

4)风光基地的公用换流站直流母线,该基地发生故障,对该风光基地和级联的风光基地影响较大,电压跌落至 0.92 pu,电流跌落 0.4~0.6 pu,功率损失近一半。

[参考文献]

- [1] 刘振亚, 张启平, 董存, 等. 通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2513-2522.
LIU Z Y, ZHANG Q P, DONG C, et al. Efficient and security transmission of wind, photovoltaic and thermal power of large-scale energy resource bases through UHVDC projects[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2513-2522.
- [2] 姚良忠, 吴婧, 王志冰, 等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6007-6020.
YAO L Z, WU J, WANG Z B, et al. Pattern analysis of future HVDC grid development [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6007-6020.
- [3] 任敬国, 李可军, 张春辉, 等. 基于直流电压-有功功率特性的 VSC-MTDC 协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 8-15.
REN J G, LI K J, ZHANG C H, et al. Acoordinated control strategy for VSC-MTDC system based on DC voltage-active power characteristic[J]. Automation of electric power systems, 2015, 39 (11): 8-15.
- [4] 李程昊. 混合直流输电系统拓扑结构及关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
LI C H. Research on topology and other key technologies of hybrid HVDC transmission system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [5] 年珩, 易曦露. 面向直流输电的双馈风电机组并网拓扑及控制技术[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1731-1738.

- NIAN H, YI X L. HVDC power transmission oriented grid-connection topology and control strategy for wind farm composed of doubly fed induction generators[J]. Power system technology, 2014, 38(7): 1731-1738.
- [6] 张新燕, 赵理威, 赵理飞, 等. 新能源多馈入直流并网与传统交流并网对比[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1121-1128.
- ZHANG X Y, ZHAO L W, ZHAO L F, et al. Contrasting analysis on multi-infeed VSC and AC grid-connection of new energy [J]. High voltage technology, 2017, 43(4): 1121-1128.
- [7] 吕敬, 施刚, 蔡旭, 等. 大型风电场经 VSC-HVDC 交流并联系统并网的运行控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 639-646.
- LYU J, SHI G, CAI X, et al. Control strategies of large wind farms integration through AC/DC parallel transmission system based on VSC- HVDC [J]. Power system technology, 2015, 39(3): 639-646.
- [8] 贾文鹏, 吴俊勇, 郝亮亮, 等. 一种应用于多端柔性直流系统的新型潮流控制器[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1073-1080.
- JIA W P, WU J Y, HAO L L, et al. A novel DC power flow controller for multi-terminal flexible DC system[J]. Power system technology, 2016, 40(4): 1073-1080.
- [9] 郭小江, 马世英, 申洪, 等. 大规模风电直流外送方案与系统稳定控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 107-115.
- GUO X J, MA S Y, SHEN H, et al. HVDC grid connection schemes and system stability control strategies for large-scale wind power[J]. Automation of electric power systems, 2012, 36(15): 107-115.
- [10] 吴金龙, 刘欣和, 王先为, 等. 多端柔性直流输电系统直流电压混合控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1593-1599.
- WU J L, LIU X H, WANG X W, et al. Research of DC voltage hybrid control strategy for VSC-MTDC system [J]. Power system technology, 2015, 39(6): 1593-1599.
- [11] 李程昊, 詹鹏, 文劲宇, 等. 适用于大规模风电并多端柔性直流输电系统控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 1-7.
- LI C H, ZHAN P, WEN J Y, et al. A multi-terminal VSC-HVDC system control strategy for large wind farms integration [J]. Automation of electric power systems, 2015, 39(11): 1-7.
- [12] 孙文博, 徐华利, 付媛, 等. 应用于大型风电基地功率外送的多端直流输电系统协调控制[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1596-1601.
- SUN W B, XU H L, FU Y, et al. Coordinated control of multi-terminal DC transmission system to send out power from large-scale wind farm [J]. Power system technology, 2013, 37(6): 1596-1601.
- [13] 李军, 胡非, 王丙兰, 等. 风速的 Weibull 分布参数[J]. 太阳能学报, 2012, 33(10): 1667-1671.
- LI J, HU F, WANG B L, et al. Weibull parameters for wind speed [J]. Acta energiae solaris sinica, 2012, 33(10): 1667-1671.

ANALYSIS OF MULTI-TERMINAL FLEXIBLE DC SYSTEM WITH LARGE SCALE POWER COLLECTION

Zhou Dengyu¹, Zhang Xinyan¹, Zhao Lifei², Zhao Liwei³, Sun Kai¹, Shi Sisi¹

(1. *Institute of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;*

2. *State Grid Kuitun Power Supply Company, Kuitun 833200, China;*

3. *State Grid Changji Power Supply Company, Changji 831100, China)*

Abstract: Based on the problem of power delivery in large-scale scenery of Northeast, Northwest and North China area, in this paper, a new branch-type multi-terminal flexible DC system (voltage source converter based multi-terminal DC, VSC-MTDC) is proposed for large-scale landscape power collection, and a branch-type five-end flexible DC system with scenery base is designed by analyzing the distribution form of regional energy base. It realizes the energy collection of the scenery base, and designs the control strategy of the sending-end converter station, realizes the fluctuation of the scenery power and the coordinated distribution of the scenery power. Finally, the stability of the design system and the effectiveness of the control strategy are validated by Digsilent modeling simulation.

Keywords: new energy; VSC-MTDC; control strategy; modeling and simulation