

交直流配电网接纳分布式电源的实时仿真研究

张宏俊, 吴越文, 陈卓, 郝正航

(贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 含多种分布式电源的交直流混合配电网是未来智能配电网的架构特点。首先, 建立了含两个区域的交直流混合配电网基本架构, 并根据各种分布式电源的容量和发电特性, 将光伏电源、直驱风机、双馈风机和储能装置接入配电网的合适区域。然后, 详细分析了交直流接口换流器的数学模型及其几种典型控制策略。最后, 利用变流器控制方式和运行策略的多样性, 对上述交直流混合配电网进行了均衡馈线出力、不间断供电和能量调度实时仿真实验。仿真结果验证了该配电网系统架构在接纳多种分布式电源方面的技术优势。

关键词: 分布式电源; 配电网; 实时仿真; 控制策略

Real-time simulation of AC and DC distribution network to receive distributed generations

ZHANG Hongjun, WU Yuewen, CHEN Zhuo, HAO Zhenghang

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guizhou 550025, China)

Abstract: AC and DC distribution network with multiple distributed generations is an architectural feature of smart distribution grid in the future. Firstly, basic framework of AC and DC distribution network containing two regions is established. Photovoltaic generation system, direct drive turbines, double-fed wind turbine and the energy storage device are connected to the distribution network according to the capacity and characteristics of various distributed generations. Secondly, the mathematical model and several typical control strategies of AC/DC interface converter are analyzed in detail as well. Finally, the real-time simulation experiments of feeder lines balancing, uninterruptable power supply and energy dispatch based on the above AC and DC distribution network are carried out by using the diversity of converter control strategy and operation mode. Simulation results verify the technology advantages of the distribution network system architecture in terms of receiving various distributed generations.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51467003 and No. 51567005) and Graduate Innovation Fund of Guizhou University (No. 2016062).

Key words: distributed generation; distribution network; real-time simulation; control strategy

0 引言

随着分布式电源、分布式储能系统、可控负荷、微电网及电动汽车充电设施等在电网中的渗透率日益提高, 配电网开始由传统的无源网络演变成有源网络, 其结构将具有多样化特征, 未来将大量出现交直流混合的复杂配电网, 新型配电系统的建模与仿真是解决诸多问题的必要准备。

未来, 局部直流系统将首先出现在中低压配电网中^[1-2]。文献[3]从投资成本和传输损耗等角度对交

流配电网和直流配电网进行经济比较, 得出了直流配电网比交流配电网传输容量大、投资成本高和传输损耗率低等结论。文献[4]采用改进的最小割集法对“手拉手”结构的交、直流配电网进行了可靠性对比, 表明了现有技术条件下直流配电网的可靠性低于交流配电网, 而直流配电网的可靠性主要受限于中压直流断路器故障率。交直流混合配电网同时具有交流配电网和直流配电网的优势, 可能是未来智能配电网的基本模式。

目前, 由于中压断路器可靠性低等原因, 国内外对交直流混合配电技术的研究大多针对微网模式^[5-9], 对中压交直流混合配电技术研究较少。本文建立了含多个分布式电源的交直流混合配电网的典

型架构，给出了交直流接口变流器的数学模型和控制策略，在此基础上开展了以下应用研究：①均衡馈线出力；②不间断转供电；③间歇性发电能量调度。

1 交直流混合配电网典型架构

1.1 网络结构

常见的配电网基本拓扑结构主要有链式结构、环状结构和两端配电结构等。交直流混合配电网的拓扑结构大多也基于以上结构，如美国弗吉尼亚理工大学 CPES 中心提出的交直流配电分层连接的混合配电系统结构，该结构包括高压输电层、中压配电层、微网层及纳网层等，在两个电源端分别采用链式交流配电网和链式直流配电网，并通过电力电子装置逐层连接下去^[10]。

本文以上述 CPES 中心提出的混合配电结构作为总体架构，结合国内分布式电源发展现状，提出了一种典型网架结构，如图 1 所示。该结构包括高压配电层、中压配电层和低压配电层。其中，中压配电层包括中压直流配电和中压交流配电，低压配

电层包括低压直流配电和低压交流配电。该结构具有如下特点：①交直流混合配电模式，便于各类分布式电源和负荷的接入，可省去许多 AC/DC 和 DC/AC 等变流环节；②多个交直流接口换流器，使得交流馈线之间构成闭环解耦结构，可提高供电可靠性和调节潮流的灵活性。网络及各节点负荷参数见表 1。

表 1 各节点负荷详细参数

Table 1 Detailed parameters of each node load

参数名	参数值	参数名	参数
B4 负荷	120+j60 kVA	B15 负荷	80 kW
B5 负荷	90+j40 kVA	B16 负荷	240 kW
B6 负荷	150+j70 kVA	B17 负荷	90 kW
B7 负荷	100+j40 kVA	B19 负荷	120+j50 kVA
B8 负荷	200+j100 kVA	B20 负荷	60+j20 kVA
B9 负荷	150+j70 kVA	B21 负荷	220+j100 kVA
B10 负荷	60 kW	B22 负荷	120+j50 kVA
B11 负荷	100 kW	B23 负荷	150+j70 kVA
B12 负荷	80 kW	B24 负荷	210+j100 kVA
B13 负荷	120 kW	B26 负荷	90+j40 kVA
B14 负荷	60 kW	低压网	420+j200 kVA

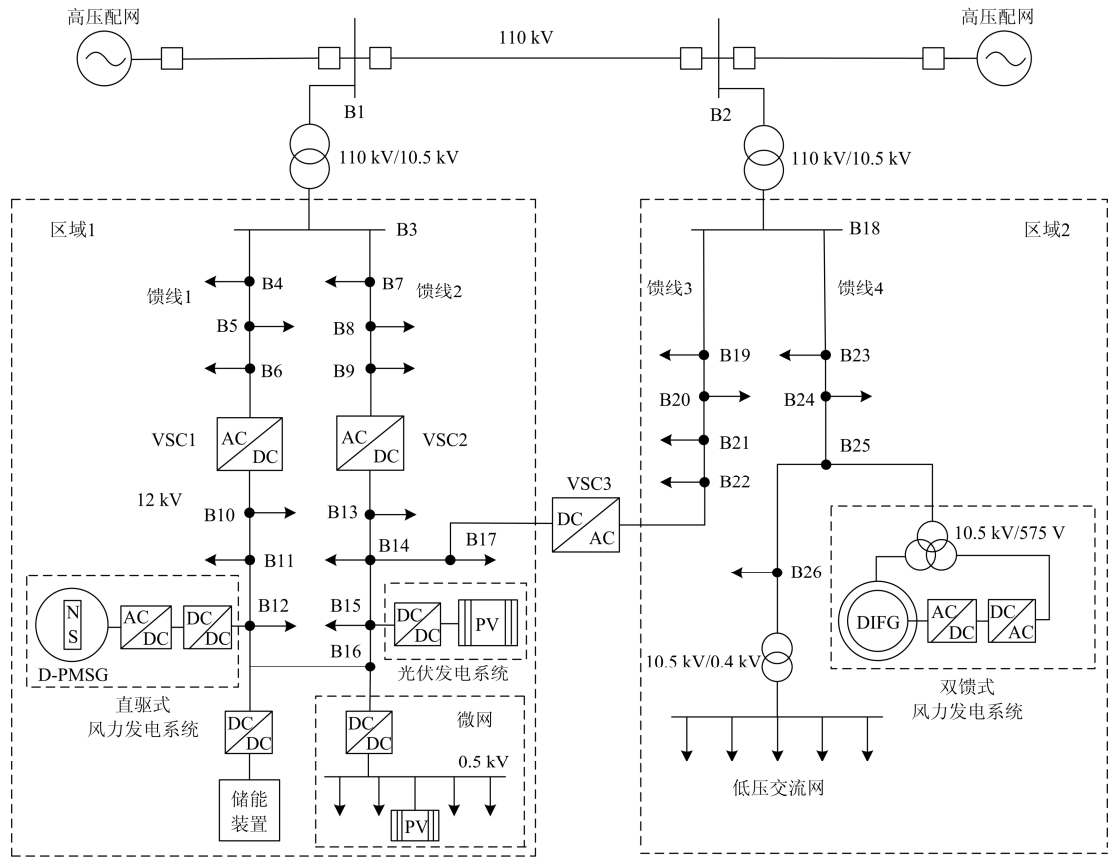


图 1 交直流混合配电网结构

Fig. 1 Structure of AC-DC hybrid distribution network

1.2 电源接入形式

为了尽可能体现未来配电系统的复杂性和代表性, 本文设想的图1系统中接入的分布式电源有光伏电池、直驱式风机、双馈式风机、储能电池; 接入模式有交流接入和直流接入两种情形。

光伏电池一般通过安装 Buck-Boost 等调压装置运行于当前光照所能到达的最大功率输出点 (MPPT 跟踪)。由于光照的随机性, 光伏发出的也是一种随机波动的直流电, 将光伏并入直流配电网, 只需 DC/DC 变流器, 且控制系统更为简单。本文在中压直流节点 B15 和低压直流节点 3 分别接入 120 kW 和 60 kW 的光伏发电系统, 另外在 B12 节点接入蓄电池组的储能装置(如图1所示)。

直驱式风机一般采用含两个电压源变流器 (VSC) 的“背靠背”基本结构。若将直驱式同步电机网侧 VSC 替换为 DC/DC 变流器而接入中压直流配电网, 则可省去 DC/AC 装置及相关控制系统。图1系统中中压直流节点 B12 接入额定功率 $P=1.5$ MW 的直驱式风机, 其参数如下: 电机极对数 $p=48$, 额定转速 $n=20$ rpm, 额定风速 $v=12$ m/s, 额定电压 $U=690$ V, 直轴和交轴电感 $L_d=L_q=0.835$ mH, 电阻 $R=0.018$ Ω , 等效转动惯量 $J=11\ 258$ kg·m²。永磁直驱同步电机数学模型及机侧矢量控制策略见文献[11-12]。

双馈式风机由于其变速恒频的运行特性, 更适合接入交流配电网, 本文将双馈式风机接入区域2的中压交流节点25, 并作为区域2主要的分布式电源。文中所用双馈式风力发电系统参数如下: 电机额定功率 $P=2.5$ MW, 极对数 $p=3$, 额定风速 $v=11$ m/s, 额定电压 $U=575$ V, 定子漏感 $L_s=0.074$ mH, 转子漏感 $L_r=0.121$ mH, 互感 $L_m=6.78$ mH, 定子电阻 $R=0.016$ Ω , 转子电阻 $R=0.0125$ Ω 。双馈式风力发电系统的数学模型及控制策略可参考文献[13]。

2 接口变流器

交直流混合配电网的关键设备是交流部分和直流部分的接口装备, 这种接口装备就是 VSC 型 DC/AC 接口变流器。接口变流器的具体结构可以有多种选择, 如两电平、三电平、模块化多电平^[14]等。无论采用哪种结构, 在系统级应用和控制策略上可以统一起来。本文仅以两电平变流器为例, 分析其系统级应用。

2.1 接口变流器的数学模型

作为交流配电网和直流配电网的接口单元, VSC 变流器使得多个交流馈线构成了闭环解耦结构, 为配电网潮流的灵活调节奠定了基础。三相

VSC 型变流器的拓扑结构如图2所示。

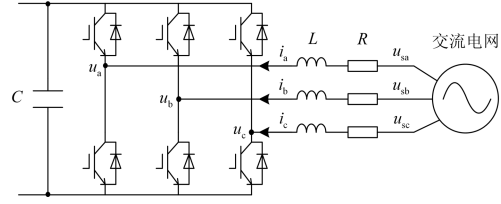


图2 三相电压源型变流器拓扑结构

Fig. 2 Topologies of three-phase voltage source converter

设交流电网相电压为 u_{sa}, u_{sb}, u_{sc} ; 换流器输出电压为 u_a, u_b, u_c ; 换流器输出电流为 i_a, i_b, i_c ; 连接电感和电阻分别为 L 和 R 。可得 VSC 在三相静止坐标系下的电压方程为

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

对上式做 dq 变换, 且按电网侧电压 u_s 定向, 可得在同步旋转坐标系下的电压方程为

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = -Ri_d + \omega_s Li_q + u_{sd} - u_d \\ L \frac{di_q}{dt} = -Ri_q - \omega_s Li_d - u_q \end{cases} \quad (2)$$

式中: i_d 和 i_q 分别为换流器的 d 轴和 q 轴电流; ω_s 为电网电角频率; u_{sd} 为电网电压 u_s 的 d 轴分量, 且 $u_{sd}=u_s$; u_d 和 u_q 分别换流器输出电压的 d 轴和 q 轴分量。

功率方程为

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} u_s i_d \\ Q = \frac{3}{2} u_s i_q \end{cases} \quad (3)$$

由式(2)可知, d 轴和 q 轴之间存在耦合项 $\omega_s Li_q$ 和 $\omega_s Li_d$, 为实现 PQ 的解耦控制, 可采用前馈补偿的方法消除二者之间的耦合, 设 $u_d^* = \omega_s Li_q + u_{sd} - u_d$, $u_q^* = -\omega_s Li_d - u_q$ 并带入式(2)可得 d 轴和 q 轴方向上 2 个独立的一阶模型, 即

$$\begin{cases} u_d^* = (sL + R) i_d \\ u_q^* = (sL + R) i_q \end{cases} \quad (4)$$

式中, s 为拉普拉斯算子。式(3)和式(4)表明 P 与 u_d^* 、 Q 与 u_q^* 呈线性关系, 若以 u_d^* 和 u_q^* 作为控制变量, 则可实现对 P 、 Q 的解耦控制。

2.2 接口变流器的控制策略

根据控制目的不同, 接口变流器的外环控制方

法分为 PQ 控制、V/f 控制和下垂控制, 而 PQ 控制又有 VQ 控制(恒直流电压恒无功功率控制)和换流器输出电压控制等变形方式^[15]。文中交直流接口 VSC 主要采取的控制方式为 PQ 控制、VQ 控制和 V/f 控制。PQ 控制的控制框图如图 3 所示, 其主要作用为改变交直流间的功率流动, 进而实现潮流优化等功能。

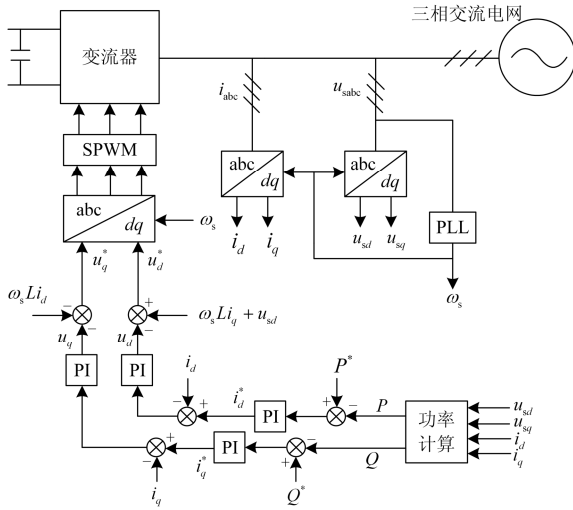


图 3 PQ 控制的控制框图

Fig. 3 Control diagram of PQ control

VQ 控制主要是为中压直流配电网提供电压支撑。将 PQ 控制中的有功功率控制替换为直流母线电压控制即可改为 VQ 控制, PI 参数也需作相应修定。实际上, 直流电压的稳定是靠控制变流器与电网之间的能量传输来实现的。

V/f 控制主要为实现交流负荷的不间断供电, 当某处线路发生故障而跳闸时, 可通过 V/f 控制为断点下游支路负荷继续提供电压和频率支撑。其内环控制与 PQ 控制相同, 外环控制如图 4 所示。恢复正常后, 若要实现由孤岛模式向并网模式的切换, 可在频率环增加相位差控制, 欲并网时, 将交流电网电压的频率和幅值作为参考信号, 同时投入相位差控制。

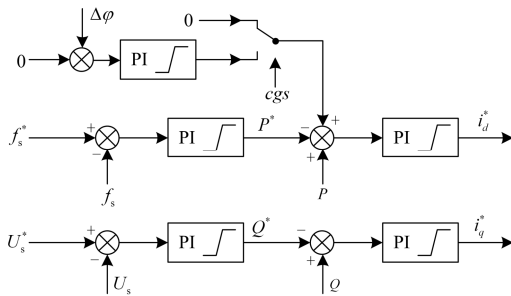


图 4 V/f 控制外环控制结构

Fig. 4 Structure of outer-loop controller in V/f control system

3 交直流混合配电网的功能优势

实际上, 若能充分运用 VSC 控策略和运行方式的多样性, 则能够实现与 SNOP(Soft normally open point)类似的功能, 如均衡馈线出力、不间断转供电、提高分布式电源消纳能力和减小线路损耗等^[16-17]。

3.1 均衡交流馈线出力

不同馈线之间控制潮流和调剂负荷对于降低线损、改善电压质量和预防过载意义很大。但是, 对于纯交流配电网, 馈线之间很难实现实时动态均衡负荷。图 1 系统则可以方便实现均衡交流馈线出力。

以均衡区域 1 的馈线 1 和馈线 2 的有功功率为例, 设 VSC1 采用 VQ 控制, VSC2 和 VSC3 不投入 PQ 控制, 分布式电源出力设为较小, 区域 1 两馈线输出功率分别为 P_1 和 P_2 , 此时直流配电网主要由区域 1 的馈线 1 提供能量。若要实现两馈线出力均衡, 馈线 2 输出功率应为 $P'_2 = (P_1 + P_2)/2$, 则 VSC2 向直流侧输送功率为 $P_{VSC2} = P'_2 - P_2$, 将此作为 VSC2 的 PQ 控制有功给定, 即可实现馈线之间的出力均衡。另外, VSC 的运行需满足其容量限制:

$$S_{VSC} = \sqrt{P_{VSC}^2 + Q_{VSC}^2} \leq S_N \quad (5)$$

3.2 不间断转供电

智能配电网属性之一就是可靠性很高, 不间断转供电是实现高可靠性的必要前提。传统配电网几乎做不到不间断转供电, 尤其在有源配电网的环境下更难做到。图 1 系统则可以方便地实现不间断转供电。

基本原理: 设正常工作时, VSC1 采用 VQ 控制, 当 VSC1 所在交流支路发生故障时(如 B4 或 B7 处), VSC1 切换为 V/f 控制, 继续为断点下游支流负荷供电, 使之运行在孤岛模式。VSC2 则切换为 VQ 控制, 继续为直流侧提供电压支撑; 当故障发生在直流配电层时(如 B14 处), VSC1 和 VSC2 均采用 VQ 控制, 分别为断点两侧负荷提供直流电压支撑。

3.3 间歇性发电的能量调度

对于含大量间歇性电源的配电网, 能量调度是必须的, 图 1 系统可方便实现能量调度。将 VSC3 运行在 PQ 控制模式, 可实现区域 1 与区域 2 之间的能量互补。当区域 1 分布式电源出力较大时, 可通过 VSC3 将多发的能量传输到区域 2 中, 以提高分布式电源的消纳能力和减轻区域 2 交流馈线负担。此时, 全网负荷可以由电网和分布式电源共同承担, 为避免区域 1 和区域 2 馈线出现有功出力小、无功出力大的情况, 可由 VSC2 和 VSC3 进行适量的无功补偿。

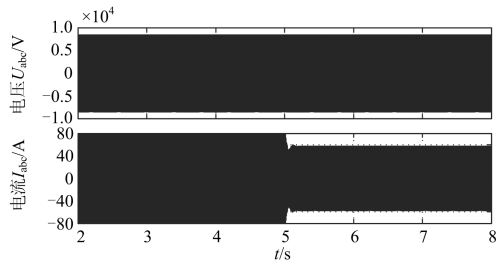
4 几种场景的实时仿真

使用通用实时仿真器(UREP)搭建图1系统的仿真模型。由于该系统包含较多分布式电源, 从实时仿真的角度看, 仿真规模较大。为此, 采用多核并行计算技术, 将网络、负荷和各分布式电源分配到4个处理器中进行实时计算。

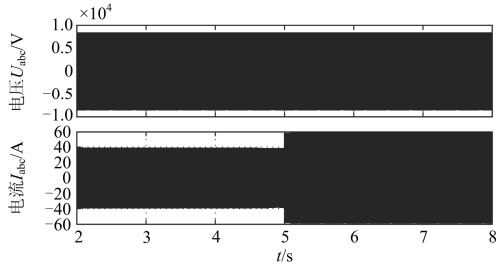
4.1 均衡交流馈线出力仿真

仿真开始时, 将光照和风速设定为某一较小值(光照设为 200 W/m^2 , 直驱式风力发电系统风速设为 5 m/s , 双馈式风力发电系统风速设为 4.5 m/s), 使各个分布式电源出力较小, 将 VSC1 设在 VQ 控制工作模式, VSC2 和 VSC3 设为 PQ 控制但不参与功率调节。待系统稳定后, 在 5 s 时, 将 VSC2 投入 PQ 控制, 对区域1交流馈线出力进行调节并使之均衡。区域1交流馈线1(B4节点和B7节点)的电压、电流如图5所示, 区域1交流馈线和 VSC1、VSC2 功率仿真波形如图6所示。

由仿真结果知, VSC2 未投入 PQ 控制时, 区域1交流馈线1需要同时向交流负荷和直流负荷(设定为 1.11 MW)供电, 因此出力很大, 约为 0.986 MW (直驱出力约为 0.165 MW), 区域1交流馈线2输送有功功率约为 0.447 MW (所接交流总负荷设定为 0.45 MW)。VSC2 投入 PQ 控制后, 馈线出力较为均衡, 分别约为 0.715 MW 和 0.714 MW , 使系统整体的潮流分布得到改善。另外, 区域2的馈线1已经过 VSC3 与区域1构成闭环接线, 也可考虑此馈线进行调节, 这里不再讨论。



(a) 区域1交流馈线1电压电流仿真结果



(b) 区域1交流馈线2电压电流仿真结果

图5 区域1交流馈线1、2电压电流仿真结果

Fig. 5 Simulation results of voltage and current of AC feeder 1 or 2 in region 1

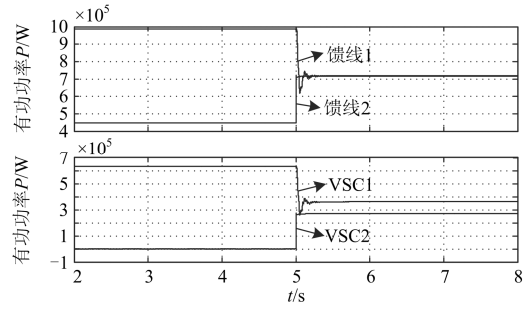


图6 区域1馈线和变流器有功功率仿真结果

Fig. 6 Simulation results of active power of feeder and converter in region 1

4.2 不间断转供电仿真

在4.1节仿真基础上, 在 10 s 时, 设节点B7和B8之间的断路器因故障而断开, 0.01 s 后将 VSC2 由 PQ 控制切换为 V/f 控制, 以实现断点下游负荷(如图1中的节点B8和B9处负荷)的不间断供电。VSC2 输出电压、电流及功率仿真波形如图7、图8所示。

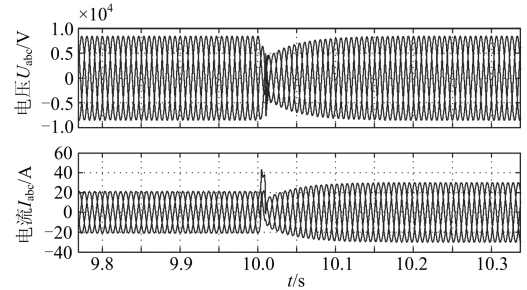


图7 VSC2 输出电压电流仿真波形

Fig. 7 Simulation waveform of voltage and current outputted by VSC2

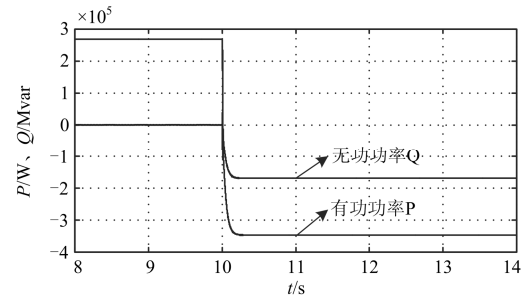


图8 VSC2 输出功率仿真结果

Fig. 8 Simulation results of power outputted by VSC2

由仿真结果知, 断路器因故障断开后, VSC2 输出电压会跌落, 0.01 s 后投入 V/f 控制, 大约经历3个周波恢复到正常值的 0.9 倍。VSC2 输出有功功率也由 0.268 MW 变为 -0.346 MW , 无功功率由 0 Mvar 变为 -0.169 Mvar , 继续向断点下游负荷($0.35+j0.17 \text{ MVA}$)供电。

4.3 间歇性发电的能量调度仿真

将所有光伏系统的光照初值设为 200 W/m^2 ,

直驱式风力发电系统的风速初值设为 5 m/s, 双馈式风力发电系统的风速初值设为 12 m/s, VSC1 采用 VQ 控制, VSC2 和 VSC3 不投入工作。待系统稳定后, 在 5 s 时, 将 VSC3 投入 PQ 控制, 将区域 2 分布式电源所发能量的一半传输到区域 1 中。在 8 s 时, 将光伏系统的光照升为 1000 W/m^2 , 直驱式风力发电系统的风速升为 13 m/s, 双馈式风力发电系统的风速降为 5 m/s, 在 9 s 时, 通过 VSC3 的 PQ 控制将子网区域 1 所发能量的一半传输到区域 2 中。各个分布式电源、VSC3、区域 1 和区域 2 总馈线(图 1 中 B3 节点和 B18 节点)的出力情况如图 9 至 11 所示。

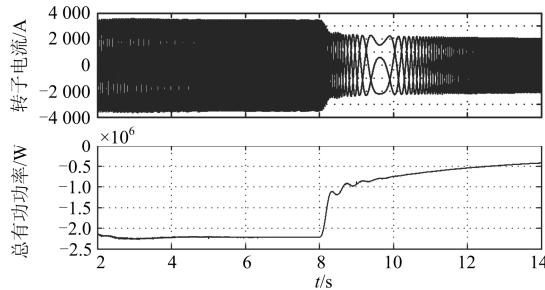


图 9 双馈式风机转子电流和输出总功率仿真结果

Fig. 9 Simulation results of the rotor current and total power of double-fed wind turbine

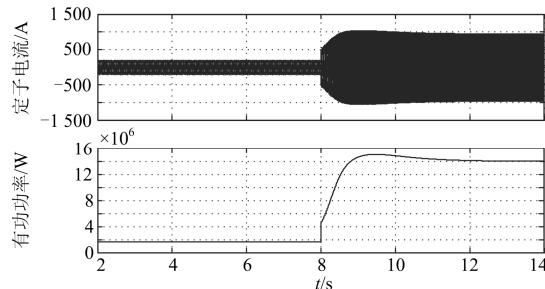


图 10 直驱式风机定子电流和输出总功率仿真结果

Fig. 10 Simulation results of the stator current and total power of direct drive turbines

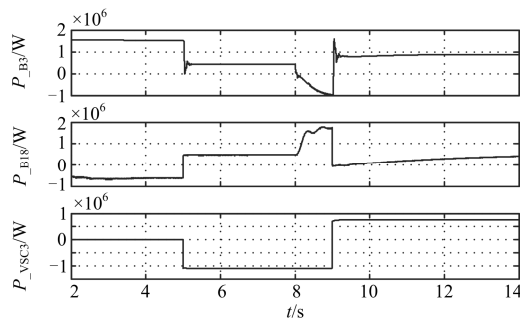


图 11 区域 1、区域 2 全部馈线和 VSC3 输出功率仿真结果

Fig. 11 Simulation results of power outputted by main feeder in region 1, region 2 and VSC3

由仿真结果知, VSC3 未投入 PQ 控制时, 此时双馈风机运行在超同步状态, 输出总有功功率约为 2.21 MW, 而区域 2 总负荷为 $1.39+j0.630 \text{ MVA}$, 因此风机多发的能量将由 B18 节点馈出, 而区域 1 的交直流负荷($1.56+j0.38 \text{ MVA}$)几乎由电网提供。5 s 时, VSC3 投入 PQ 控制, 向区域 1 输送 1.1 MW 有功, 此时主要由电网和双馈风机共同承担区域 1 和区域 2 负荷, 所以区域 1 馈线出力减小, 区域 2 馈线功率也由负值变为正值。8 s 时, 双馈风机由于风速锐减而逐渐过渡到亚同步状态, 输出功率逐渐减小, 区域 2 馈线出力也相应增加。直驱风机和光伏系统分别由于风速和光照增大, 输出功率也增加(直驱出力由于恒功率控制逐渐稳定到额定功率值), 加上 VSC3 输入的功率, 已大于区域 1 负荷所需功率, 区域 1 馈线功率也相应由正值变为负值。9 s 时, VSC3 经 PQ 控制由向区域 1 输送功率转变为向区域 2 输送功率(0.75 MW), 此时主要由电网和直流层的分布式电源共同承担区域 1 和区域 2 负荷, 所以区域 1 馈线功率由负值变为正值, 区域 2 馈线出力也减小, 通过能量调度, 提高了分布式电源的消纳能力。由仿真结果也可知, 由直流层分布式电源和变流器引起的能量冲击会经采用 VQ 控制的换流器反映到所接交流网络, 而对采用 PQ 控制的换流器所接交流网络影响很小。

5 结论

本文针对含多种分布式电源的交直流混合配电网基本架构, 灵活运用 VSC 控制策略, 通过实时仿真验证了未来网源架构下的经济、可靠运行。若干场景的仿真试验验证了合适的电源布局、接入地点和接入方式是这种复杂系统可靠运行的前提。均衡馈线出力、不间断供电和能量调度等技术优势可以在未来配电网中实现。

参考文献

- [1] 江道灼, 郑欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 98-104.
JIANG Daozhuo, ZHENG Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 98-104.
- [2] 宋强, 赵彪, 刘文华, 等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 36(8): 9-19.
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 36(8): 9-19.

- [3] 郑欢, 江道灼, 杜翼. 交流配电网与直流配电网的经济性比较[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3368-3374.
ZHENG Huan, JIANG Daozhuo, DU Yi. Economic comparison of AC and DC distribution system[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3368-3374.
- [4] 曾嘉思, 徐习东, 赵宇明. 交直流配电网可靠性对比[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2582-2589.
ZENG Jiasi, XU Xidong, ZHAO Yuming. Reliability comparison of AC and DC distribution network[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2582-2589.
- [5] 丁明, 田龙刚, 潘浩, 等. 交直流混合微电网运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 1-8.
DING Ming, TIAN Longgang, PAN Hao, et al. Research on control strategy of hybrid AC/DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 1-8.
- [6] 张树东, 朱大为, 刘闯, 等. 交直流混合配电型通用功率变换器(UPC)研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 48-55.
ZHANG Shudong, ZHU Dawei, LIU Chuang, et al. Universal power converter (UPC) for hybrid AC and DC distribution[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 48-55.
- [7] TAN K T, PENG X Y, SO P L, et al. Centralized control for parallel operation of distributed generation inverters in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1977-1987.
- [8] XIAO Huagen, LUO An, SHUAI Zhikang, et al. An improved control method for multiple bidirectional power converters in hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 7(1): 340-347.
- [9] 陶以彬, 李官军, 柯勇, 等. 微电网并/离网故障特性和继电保护的配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 95-100.
TAO Yibin, LI Guanjuan, KE Yong, et al. Research on the fault characteristics and relay configuration of micro-grid in the grid and off-grid mode[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 95-100.
- [10] BOROEYEVICH D, CVETKOVIC I, DONG D, et al. Future electronic power distribution systems: a contemplative view[C] // 2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment. Basov, Russia: IEEE, 2010: 1369-1380.
- [11] 尹明, 李庚银, 张建成, 等. 直驱式永磁同步风力发电机组建模及其控制策略[J]. 电网技术, 2007, 31(15): 61-65.
YIN Ming, LI Gengyin, ZHANG Jiancheng, et al. Modeling and control strategies of directly driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator[J]. Power System Technology, 2007, 31(15): 61-65.
- [12] 高峰, 周孝信, 朱宁辉, 等. 直驱式风电机组机电暂态建模及仿真[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 29-34.
GAO Feng, ZHOU Xiaoxin, ZHU Ninghui, et al. Electromechanical transient modeling and simulation of direct-drive wind turbine system with permanent magnet synchronous generator[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 29-34.
- [13] 李岩松, 郭世繁, 任国威, 等. 双馈式风力发电系统的机电暂态建模与运行分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 104-109.
LI Yansong, GUO Shifan, REN Guowei, et al. Modeling and operation simulation of doubly-fed type wind power generation system electromechanical transient model[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 104-109.
- [14] 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.
- [15] 王成山, 李琰, 彭克. 分布式电源并网逆变器典型控制方法综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(2): 12-20.
WANG Chengshan, LI Yan, PENG Ke. Overview of typical control methods for grid-connected inverters of distributed generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(2): 12-20.
- [16] BLOEMINK J M, GREEN T C. Increasing distributed generation penetration using soft normally-open points[C] // 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 25-29, 2010, Minneapolis, MN, USA: 8p.
- [17] 王成山, 孙充勃, 李鹏, 等. 基于 SNOP 的配电网运行优化及分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 82-87.
WANG Chengshan, SUN Chongbo, LI Peng, et al. SNOP-based operation optimization and analysis of distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 82-87.

收稿日期: 2016-01-05

作者简介:

张宏俊(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子与电力传动控制技术;

吴越文(1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子与电力传动控制技术;

郝正航(1972-), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为风力发电、微电网、柔性直流输电、电力系统稳定分析与控制。E-mail: haozhenghang@163.com

(编辑 姜新丽)