

大容量直驱风电机组级联直流组网系统设计*

厉 孟¹, 谢 桢², 李长乐³

- [1. 海军驻北京作战系统 军事代表室, 北京 100094;
2. 海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430033;
3. 上海电器科学研究所(集团)有限公司, 上海 200063]

摘 要: 传统交流组网风电场系统存在多次电能转换、成本高的问题。针对这个问题, 设计了一种大容量直驱风电机组级联直流组网海上风电场系统, 其直接将每台机组的直流输出级联形成高压直流进行传输, 而无需额外的海上升压站平台。风电机组采用了永磁直驱风力发电机及其变流器, 其中变流器包括了 AC/DC 单元和 DC/DC 单元, 并设计了控制策略, 即通过 DC/DC 单元的占空比调节来实现电流的持续输出和最大功率跟踪。陆基逆变电站采用晶闸管型逆变器, 设计了工作模式和控制策略, 其主要功能是实现高压直流链路的电压电流调节。最后, 基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台, 搭建了容量为 150 MW 的风电场系统进行了仿真计算, 计算结果验证了该系统具有较高的鲁棒性和对风速变化的适应性, 同时每个机组都能独立的实现最大风能捕获。

关键词: 风力发电; 海上风电场; 高压直流链路; 直流组网

中图分类号: TM 315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)05-0046-06

Design of Large Capacity Direct Drive Wind Power Unit Cascaded DC Grid System*

LI Meng¹, XIE Zhen², LI Changle³

- (1. Military Representative Office, Naval Operations in Beijing, Beijing 100094, China;
2. National Key Laboratory for Vessel Integrated Power System Technology, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;
3. Shanghai Electrical Apparatus Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

Abstract: The traditional AC network wind farm system has some problems, such as repeated electrical energy conversion, high cost. Aiming at it, A large capacity direct drive wind power unit cascaded DC grid system was designed. The network allowed series interconnection of wind turbines to distributed high-voltage DC (HVDC) power transmission without the AC transformer and the offshore platform. The direct drive permanent magnet power generator (PMSG) and the converter were used in the wind turbine. The converter including the AC/DC unit and the DC/DC unit, and the control strategy has been designed, that was allowed the current to flow at all times in the DC link while simultaneously regulating generator torque by adjusting the duty of the DC/DC unit. The working mode and the control strategy of the land-based thyristor-based inverter power plant had also been developed to realizing the voltage and current regulation of the HVDC link. At last, a complete 150 MW wind farm simulation based on PSCAD/EMTDC

* 基金项目: 国家自然科学基金重大项目(51490681); 电力电子器件及其组合混杂系统多时间尺度的动力学表征; 国家 973 项目(2015CB251004); 大功率全控型电力电子器件失效机理及尽限应用; 国家自然科学基金项目(51477180); 考虑非线性变频特性的舰船综合电力非正弦供电 MW 级中频变压器建模和损耗评估项目

作者简介: 厉 孟(1985—), 男, 工程师, 研究方向为电气工程。

谢 桢(1985—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子与电气传动。

李长乐(1983—), 男, 工程师, 研究方向为电力电子与电力传动。

was built, and some calculations had been done. The simulation results indicated that the stable operation of the proposed configuration where each turbine was able to independently perform peak power tracking and the robustness and adaptability to the change of wind speed was also good at the same time.

Key words: wind power generation; offshore wind farms; high-voltage DC power transmission; DC grid

0 引言

与其他可再生能源相比,风能增长迅速,在能源利用中占比越来越大^[1-3]。目前海上风电场的研究已经取代陆基风电,成为了研究热点^[4]。但是,一个制约海上风电场发展的的问题就是如何集中每个机组的电能并进行远距离传输。

文献[5]中提到了一个典型的欧洲海上风电场项目,其使用了 36 kV 的海底交流电缆在机位收集电能到海上第一级变压器电站平台,升压至 154 kV 电压等级,然后再用较短的高压电缆输送至第二级整流器电站平台,实现从高压交流到高压直流的转换,再进行长距离海底传输到陆基电站,通过逆变器馈送电能到电网。这种风电场组网设计需要电能的多次转换,以及多级海上变电平台,成本较高,因此更多的海上风电场组网形式被提出^[6-11]。文献[6]提出的组网方案中,每个机组都包含了一个单独的变压器进行升压,这样将失去成本优势。文献[7]提出的组网方式中,每个机组内部都有一个独立的升压直流变换电路,从而实现机组高压直流并联的输出,但一个较大的局限性是流经高压直流汇流排到中央变换器的电流较大,增加了系统设计难度。文献[8]分析了每个机组通过将输出直流级联进行组网的海上风电场方案,但使用的是主从模式设计,从机使用的是电流源型变流器,冗余性较差。文献[9]提到的方案中,机组使用了高频变压器和高频链电路,但变压器的使用增加了体积、重量及成本。因此,文献[10]指出了分布式直流级联组网较传统交流组网具有更多的优势,因而本文在其基础上,设计了一种直驱风电机组级联直流组网的海上风电场系统,并基于 PSCAD/EMTDC 仿真软件对系统进行了仿真试验。

1 变流器拓扑结构及其参数

本文所研究的海上风电场结构如图 1 所示。其中风力发电机组采用直驱永磁风力发电机 (Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG)

方案^[11]。风机的交流输出到变流器 AC/DC 单元和 DC/DC 单元,然后级联形成高压直流(High-Voltage DC, HVDC)链路。

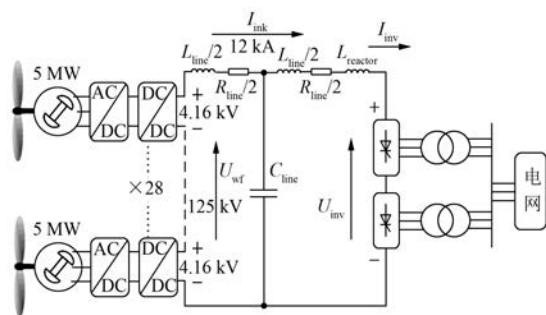


图 1 HVDC 输电的海上风电场结构

电能通过 HVDC 链路传输以后达到陆基电站, 电站主要由晶闸管型逆变器和升压变压器构成。由于使用了基于晶闸管设计的逆变器, HVDC 链路可以工作在较弱的风能条件下, 即直流母线电压较低的情况下实现能量传输, 此外还不需要较大容量的电容器直接接入到高压端, 这是较电压源型逆变器传输的一个优势所在^[12]。从图 1 还可以看出, 采用陆地变电站可以避免传统组网用到的高成本集中整流电站及其海上平台。

2 风机参数和变流器控制策略

风力发电从陆基转移到海上以后,单机容量持续上升,而具有代表性的就是 5 MW 级的直驱永磁风电机组方案^[13]。因为海上风电场安装成本显著,70% 的安装成本用于海上平台和传输电缆的安装,所以功率密度更高、容量更大的 5 MW 机型优势较大,其参数如表 1 所示^[14]。

2.1 风电变流器结构

如图 2(a) 所示, 风电变流器主要包括 AC/DC 单元和 DC/DC 单元, 两者之间有一个大容量直流电容。如图 2(b) 所示, DC/DC 单元包括两种不同的电流流向状态, 分别为 ON 状态和 OFF 状态。在 ON 状态下, 电容电压引入到 HVDC 链路, 发电机组的潮流也进入到电网中, 而在 OFF 状态下, 电容被旁路, 但需要保证电流的连续性。

表 1 风电机组相关参数

参数	数值
发电机额定功率 P_G/MW	5
额定风速 $v_{\text{wind}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	12
额定机械角速度 $\omega_m/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	1.55
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	1.06×10^7
发电机额定电压 E_{PM}/V	2 890
发电机电对数 p	290
发电机同步电感 L_S/mH	4.33
变流器额定功率 P_C/MW	5
变流器直流电容 C_{dc}/mF	3
变流器开关频率 f_c/Hz	1 000

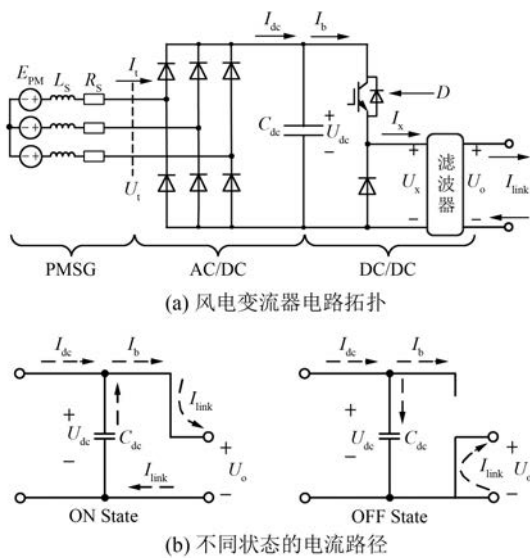


图 2 风电变流器结构

从图 2 可以看出,DC/DC 单元拓扑为单象限 Buck 斩波器,其由一个 IGBT 和相应二极管构成,控制 IGBT 的开关状态可以实现 ON 状态和 OFF 状态的切换。单象限 Buck 斩波器的优势还在于其能确保一个连续的 HVDC 电流通路,同时还能在链路发生故障时将大容量储能电容隔离,避免故障范围扩大。同时变流器 DC/DC 单元还可以升级为两象限斩波器,实现能量的双向流动,以应对风机需要能量进行初始起动的工况。

图 2(a) 中 U_t 和 I_t 为发电机输出电压和电流, I_{dc} 和 I_b 为直流电容输入和输出电流, U_{dc} 为直流电容电压, U_x 和 I_x 为斩波器输出电压和电流, U_o 为变流器输出电压, I_{link} 为 HVDC 链路电流, D

为斩波器控制占空比。Buck 电路的数学方程为^[15]

$$\begin{cases} I_b = DI_x \\ U_x = DU_{\text{dc}} \end{cases} \quad (1)$$

进一步有:

$$C_{\text{dc}} = \frac{dU_{\text{dc}}}{dt} = I_{\text{dc}} - DI_{\text{link}} \quad (2)$$

在整流器连续导通模式下,考虑电感换向过程和忽略了定子电阻后可得到状态空间平均模型方程为^[15]

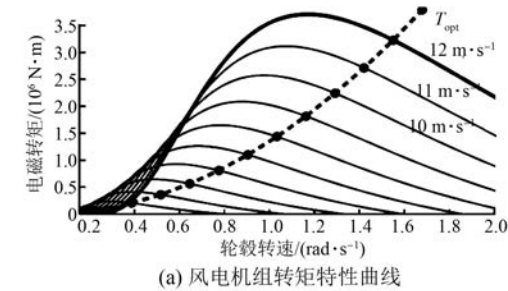
$$\begin{cases} U_{\text{dc}} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} [E_{\text{PM}}]_{\text{LL}}^{\text{RMS}} - \frac{3}{\pi} \omega_e L_S I_{\text{dc}} \\ [I_t]_1^{\text{RMS}} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_{\text{dc}} \end{cases} \quad (3)$$

其中 ω_e 为电磁角速度,而功率因数 PF 近似为^[15]

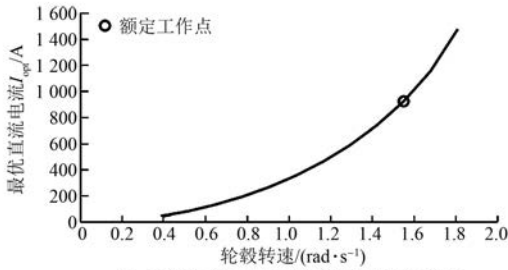
$$PF = 1 - \frac{\omega_e L_S I_{\text{dc}}}{\sqrt{6} [E_{\text{PM}}]_{\text{LN}}^{\text{RMS}}} \quad (4)$$

2.2 最大风能捕获算法

风电变流器系统控制目标是通过控制实现风电机组的最大风能捕获,这可以通过调整发电机的电磁转矩使其工作在如图 3(a) 所示的最优转矩曲线上。考虑到变流器前端二极管不控整流器的电流不可直接控制,故采用 DC/DC 单元来间接控制实现整流器电流输出的调节。发电机电磁转矩 T_e 的表达式为



(a) 风电机组转矩特性曲线



(b) 最优电流与风机轮毂转速对应关系

图 3 最大风能捕获算法曲线

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_m} = \frac{3[E_{PM}]_{LN}^{RMS} [I_t]_1^{RMS} PF}{\omega_m} \quad (5)$$

其中 ω_m 为机械角速度, 而对于 PMSG, 输出电压与 ω_m 的关系为

$$[E_{PM}]_{LN}^{RMS} = k_{PM} \omega_m \quad (6)$$

其中 k_{PM} 为定子磁链常数, 由于极对数 p 已知, 故 ω_m 和 ω_e 关系为

$$\omega_e = \frac{p}{2} \omega_m \quad (7)$$

综合以上公式, 结合式(3)和式(4), 可推导出 T_e 与 I_{dc} 的关系为

$$T_e = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} k_{PM} I_{dc} - \frac{3}{\pi} \frac{p}{2} L_S I_{dc}^2 \quad (8)$$

对于任意的轮毂转速, 可通过式(8)求解, 对应最优转矩 T_{opt} 的最优直流电流 I_{opt} 为

$$I_{opt} = \frac{\frac{3\sqrt{6}}{\pi} k_{PM} - \sqrt{\frac{54}{\pi^2} k_{PM}^2 - \frac{12}{\pi} \frac{p}{2} L_S T_{opt}}}{\frac{6}{\pi} \frac{p}{2} L_S} \quad (9)$$

根据式(9), 图 3(a) 的最优转矩曲线可以映射到图 3(b) 的轮毂转速与最优直流电流 I_{opt} 的对应曲线。

2.3 变流器系统控制策略

为了使系统工作在最优工作点, 即达到最优直流电流 I_{opt} , 需要设计一个控制器来调节 DC/DC 单元的占空比。结合式(2)和式(3), 可推导出变流器系统的动态方程为

$$C_{dc} = \frac{d}{dt} \left[\frac{3\sqrt{2}}{\pi} [E_{PM}]_{LN}^{RMS} - \frac{3}{\pi} \omega_e L_S I_{dc} \right] = I_{dc} - DI_{link} \quad (10)$$

引入拉普拉斯变换, 可得到:

$$I_{dc} = \frac{s \frac{3\sqrt{2}}{\pi} [E_{PM}]_{LN}^{RMS} C_{dc} + DI_{link}}{s \frac{3}{\pi} \omega_e L_S C_{dc} + 1} \quad (11)$$

根据式(10)和式(11), 设计了如图 4 所示的变流器控制器框图。图 4 中 E_{PM} 动态是作为一个扰动引入到系统中, 在稳态时, 扰动产生 0 输出, 而在风机加速或者减速时, 一个线性的斜坡函数扰动将产生一个恒定的输出, 因而可用一个 PI 调节器控制, PI 参数可根据经典的控制理论进行设计。

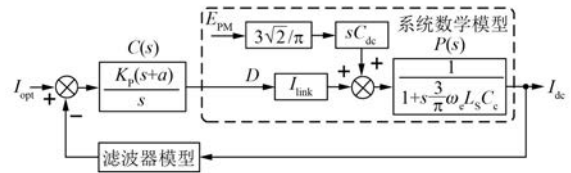


图 4 风电变流器控制框图

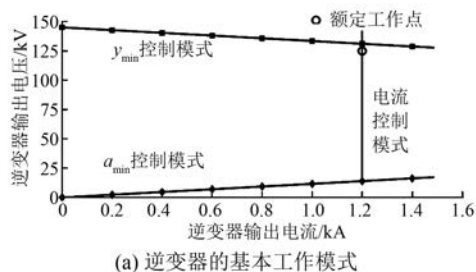
3 陆基逆变器电站设计

陆基逆变器电站的控制目标是调节 HVDC 链路的电流。假设交流电网为无穷大电网, 暂不考虑电网突变, 因此忽略交流侧滤波器动态, 而直流母线电压完全由风场输出电能决定。文中风电场包括 30 台 5 MW 机组, 额定 I_{link} 设计为 1.2 kA, 单个机组的额定电压注入将达到 4.16 kV, 级联后高压直流将达到 125 kV, 具体的风电场系统模型如图 1 所示, 其中假设电缆传输距离为 25 km, 线路分布参数分别为 R_{line} 、 L_{line} 、 C_{line} 和 $L_{reactor}$ 。

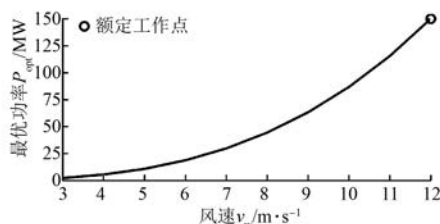
通过控制晶闸管的触发角 α , 可控制逆变器输出电流恒定, 即电流控制模式, 限制触发角 α 在 $90^\circ \sim 145^\circ$ 可保证必要的反电势。当控制器饱和, α 维持 90° , 则称为 α_{min} 控制模式。此外控制器还进行关断角 γ 监测, 当 γ 达到边界时, 逆变器进入到 γ_{min} 控制模式, 以避免换向故障。如图 5(a) 所示为逆变器的 VI 特性曲线图, 图中的垂直线为恒定额定电流 1.2 kA, 还绘出了 α_{min} 控制模式曲线和 γ_{min} 控制模式曲线。为了推导整流器的 VI 特性曲线, 做出以下假设: (1) 假设风场中每个机位的风速一致; (2) 每个机位都工作在最优功率点; (3) 忽略风电变流器的损耗。基于假设, 风场的输出总功率是风速的函数, 具体如图 5(b) 所示, 结合不同风速和对应的最优输出功率可绘制整流器的 VI 曲线, 具体的不同风速的 VI 曲线的计算式如下:

$$U_{wf} = \frac{P_{opt}(v_w)}{I_{link}} \quad (12)$$

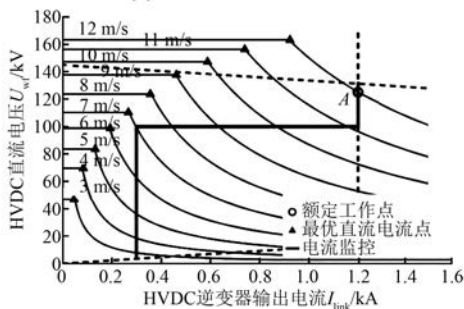
其中 U_{wf} 为 HVDC 的直流电压, 选取风速点后可得如图 5(c) 所示曲线簇, 图中可以看出当占空比 D 增加时, I_{link} 就相应要减小。三角形标记的点代表了占空比 D 为 1 的运行点, 此时 $I_{link} = I_{opt}$ 。这些点代表了运行边界, 超过边界, 则无法获取最佳功率, 即风机应始终运行在 $I_{link} > I_{opt}$, 而这需要



(a) 逆变器的基本工作模式



(b) 风电场的最优功率点



(c) VI特性曲线和逆变器电流监控

图5 VI特性曲线和逆变器电流监控

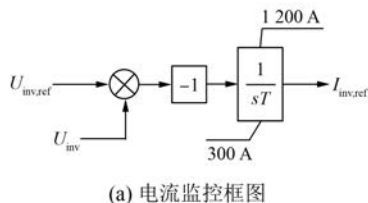
对逆变器选择合适的控制策略来保证。不同风速下的输出电压可以通过式(13)进行计算:

$$U_{wf} = \begin{cases} \frac{P_{opt}}{I_{link}}, & (I_{link} \geq I_{opt}) \\ \frac{P_{opt}}{I_{opt}}, & (I_{link} < I_{opt}) \end{cases} \quad (13)$$

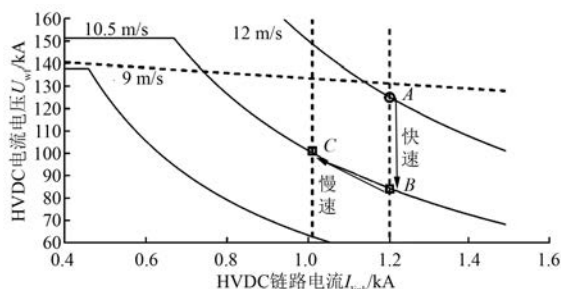
将基于晶闸管的逆变器工作特性曲线也绘制在图5(c)中,如虚线所示,可以看出,系统的额定工作点A就是在风速为12 m/s的VI特性曲线与虚线相交处。

考虑到电流始终控制在额定1.2 kA处,那么当风速过低时,系统电压也很低。故设计一个电流监控器如图6(a)所示,其主要由包含限幅的积分器来实现,上限设置为1.2 kA,下限设置为300 A,积分器的输入为HVDC链路参考电压和实际电压的差值。如图6(b)所示,系统位于额定工作点A时,风速从12 m/s降至10.5 m/s,故工作点从A转移到B,其过程的时间尺度是由风机

机械惯性决定的,要快于电流监控响应,而之后从B点转移到C点的过程,则是由电流监控系统作用下较慢的过程,同时直流电压升高至100 kV。电流监控器的主要作用就是缓慢调节参考电流的设置点来维持HVDC链路的电压。上述过程表明减少参考电流可提高直流电压,但过程需要慢,时间尺度要调节在几分钟,这也避免了与整流器端控制的冲突,后者在毫秒级时间尺度进行控制。



(a) 电流监控框图



(b) 电流监控下系统的动态响应

图6 电流监控控制器设计

4 风电场组网仿真研究

为了验证前述分析以及系统组网的可行性,基于PSCAD/EMTDC仿真平台^[16-17],搭建了仿真模型对风电场组网系统进行仿真验证。风电场模型包括了30台5 MW风机,为了简化分为6组,每组5台,而线路阻抗参数为 $R_{line} = 2.4 \Omega$, $L_{line} = 17 \text{ mH}$, $C_{line} = 11.5 \mu\text{F}$, $L_{reactor} = 249 \text{ mH}$ 。

首先进行大风工况仿真,所有风机处于额定风速,仿真结果如图7所示。仿真初始,每组风机都注入了相同的电压,占空比控制也保持一致,在5~25 s时间内,将不同组的风速设置不同的变化,然后这时不同机组的占空比改变以保持最大功率跟踪和维持直流电流在1.2 kA。从图7可以看出:调节过程迅速,且伴随着直流电压下降,接着在电流监控器的作用下,电流开始下降,从而直流电压缓慢抬升,而风电变流器的占空比控制始终维持最大功率追踪。从图7(b)中可以看到每组机组的稳态工作点是符合最佳负荷曲线,也验

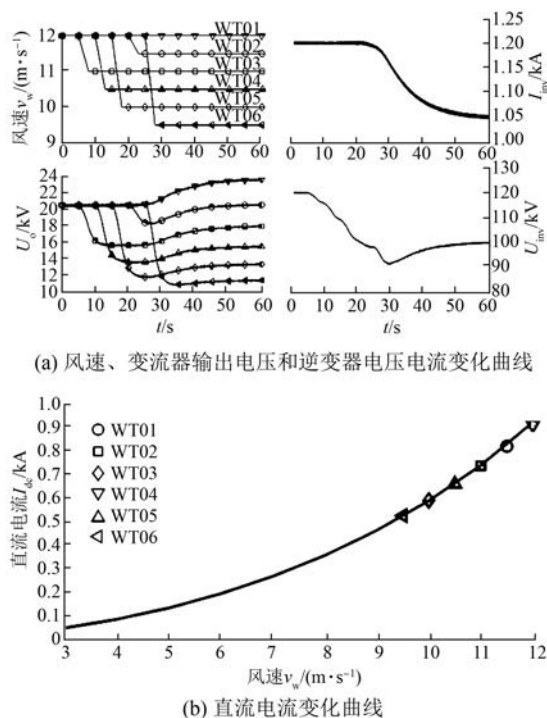


图7 大风工况仿真结果

证了每个机组都工作在最优功率点。

第二种仿真模拟了低风速工况,结果如图8所示。此次仿真中所有机组的风速变换相同,风机风速从5 m/s突然增加到9 m/s,此时风电变流器的占空比快速响应,以跟踪风机功率的变化,直流电压从35 kV迅速升高到130 kV。但是,电流开始调节,从最开始的300 A增加到600 A,同时后电压下降到100 kV,从图8中注意到电压达到131 kV时即被限制住了,因为此时已经到了最大的触发角 $\alpha = 145^\circ$,维持几秒后,随着电流的增加,逆变器又回到了正常的电流控制模式。

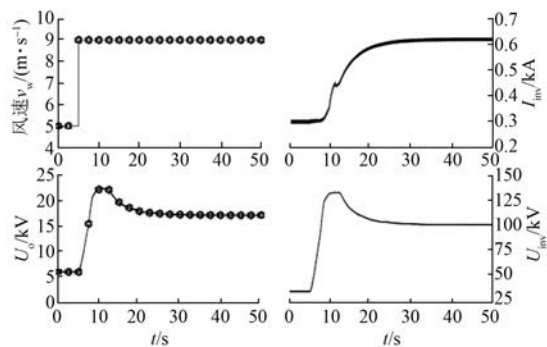


图8 小风工况仿真结果

5 结 语

本文主要围绕大容量直驱风电机组级联直流组网系统开展设计,同时基于仿真平台对150 MW级的风电场算例进行了仿真计算。现总结主要结论如下:

(1) 通过将变流器设计为AC/DC和DC/DC两级单元,可以实现机组输出的直接级联,同时引入占空比控制结合最大风能捕获算法可以实现单机的最优功率点运行。

(2) 对于陆基逆变器的设计,采用了经典的晶闸管逆变电路,通过对电流控制、 α_{min} 控制和 γ_{min} 控制这三种工作模式设计,结合电流监控器的设计,达到了控制HVDC链路电压电流调节的功能。

(3) 仿真结果验证了该组网系统在不同工况下的运行能力,为风电场的实际建设提供了依据。

进一步需要研究的内容是当电网发生故障时,如何实现组网系统的选择性保护和重构。

【参考文献】

- [1] 郑晓坤.海上风电场组网与大容量变流器实现形式对比研究[J].电力电容器与无功补偿,2016,37(2): 95-104.
- [2] 徐晓宾,李凤婷.不对称故障下直驱永磁风电机组运行控制方式综述[J].电力电容器与无功补偿,2016,37(1): 96-102.
- [3] 王林,杨佳俊,陈红,等.含风电场的电网潮流计算[J].电力电容器与无功补偿,2015,36(1): 49-53.
- [4] 林鹤云,郭玉敬,孙蓓蓓,等.海上风电的若干关键技术综述[J].东南大学学报,2013,41(4): 882-888.
- [5] STARK G. Integration of offshore wind with modern HVDC technology[C]// 8th Int Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Farms, Bremen, Germany, October 2009: 1-9.
- [6] DENG F, CHEN Z. An offshore wind farm with DC grid connection and its performance under power system transients[C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, USA, 2011(7): 24-29.

(下转第79页)