

直流串并联海上风电机组控制策略

李响, 韩民晓, 许东

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学电气与电子工程学院), 北京 102206)

摘要: 以 VSC-HVDC 技术为基础, 提出了海上风电场直流并串联拓扑结构。此结构可以采用简化结构的永磁直驱风机, 具有直流升压的优势, 减少了变电站和换流站所需的海上平台建设, 也减少了变压和换流过程中的损耗, 降低了系统复杂度, 减少了建设成本, 有利于系统维护。同时此结构在一定程度上解决了风机串联结构和并串联结构中故障所造成的系统波动和支路环流的问题。提出了针对直流串并联结构的协调控制策略。最后通过软件仿真验证该结构的稳定性和控制策略的有效性。

关键词: 海上风电场; 直流并串联; 低电压穿越; 最大功率追踪

Control strategy of DC parallel-series offshore wind turbines

LI Xiang, HAN Minxiao, XU Dong

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: This paper proposes a DC parallel-series topology structure for offshore wind farm based on the VSC-HVDC technology. It uses permanent magnetic synchronous generator wind turbines with simplified structure, which has the advantage of DC boost, decreasing the required offshore platform construction that the substation and converter station needed, reducing the losses occurred during commutation and transformer process, reducing the complexity of the system, construction costs and being conducive to system maintenance. Also, this structure to some extent solves the problems of system fluctuations and branch circulation caused by wind turbine faults in DC series system and DC series-parallel system. Therefore, this paper presents a coordinated control strategy for DC parallel-series structure. Finally, the stability of this structure and effectiveness of the control strategy are validated through the software simulation experiments.

This work is supported by National Key Technology R & D Program of the Ministry of Science and Technology of China (No. 2009BAA22B01).

Key words: offshore wind farm; series multi-terminal VSC-HVDC; low voltage ride through; MPPT

中图分类号: TM721.1 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)03-0046-07

0 引言

随着环境污染和气候的形势日益恶化, 可再生能源发展越来越受到世界的重视。风电由于其技术和成本的优势在各种可再生能源中成为发展最快的一种能源, 现在已经成为一种重要的能源来源^[1-4]。因为海上风资源更为丰富并且更为优质, 同时海上受环境和地域限制更少, 所以今年来海上风电发展十分迅速, 其投入和建设规模已经有超过陆上风电的趋势^[5-6]。随着海上风电技术的发展, 其容量规模

越来越大, 而离岸距离也越来越远^[7]。海上风电的传输相关技术成为了海上风电发展的关键。

相比于传统的高压交流输电, 高压直流输电在海上风电传输中更加经济。尤其近年来快速发展的电压源型高压直流(VSC-HVDC)技术更具有控制灵活性和经济性^[8]。

关于海上风电直流传输已经有一定的研究, 依照传统高压直流传输结构, 主要是采用交流汇聚然后将电流通过变压器升压, 再经海上换流站转换为直流传输回岸上换流站, 经电能变化后输入电网。文献[9-11]采用直流并联汇聚然后用直流 DC/DC 升压传输。虽然两种电能汇聚方式不同, 但都需要建

设海上平台来进行电能升压处理。为了减少升压带来的损耗和海上平台建设成本, 文献[12-14]都采用了直流串联升压的办法, 但是这几种拓扑结构在都存在一定问题, 直接串联结构串联过长对离地远端风机耐压绝缘要求会很高, 并且在风机退出处理时串联电压会波动较大; 而串并联结构虽然避免了在风机故障退出时电压较大波动, 但是支流电流控制存在不确定性, 风机故障退出会造成直流环流; 矩阵结构主要考虑单机故障时可以平衡故障支路电压, 但是由于替代连接风机需要通过两个直路电流, 所以器件容量裕度要求较大, 成本不够经济。本文提出一种直流串并联传输结构, 同样具有直流串联升压的优点, 而相对于此前几种串联结构, 这种结构在风机故障退出时电压波动相对较小, 而电流会按功率比值分配给并联几台风机, 减小了单台风机乘载过多电流的压力; 通过风电场控制在不加装硬件的情况下可以实现风电场低电压穿越; 在这种结构下还可以将永磁风机简化接入更加节约成本降低系统复杂度。本文重点研究分析了此结构下风机控制策略和风电场控制策略, 并利用仿真软件对其有效性进行了仿真验证。

1 直流串并联结构

本文所提出的直流串并联结构如图1所示, 每台风机连接一个AC/DC换流器即简化结构的永磁直驱风机, 然后将迎风面同一排的风机直流侧并联起来, 再将并联风机组成的机群再串联起来。将同一迎风面风机并联是为了尽量使并联机群中的风机功率接近, 可以将系统串联电流平均分配到每个风机, 不会因为功率差过大而出现电流过大的情况。图中换流器都采用VSC-HVDC换流器。岸上换流器将承载整个风电场功率, 其可以采用多端形式或者MMC换流器, 本文采用两电平VSC换流器是为了研究方便, 其控制算法可以方便地推广到多端和MMC换流器。

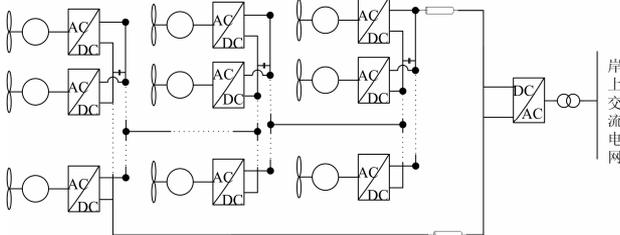


图1 直流串并联风电机组拓扑图

Fig. 1 Topology of DC parallel-series wind turbines

2 直流串并联风机控制

从图1中可以看出将永磁同步风机简化后, 由

永磁电机连接一个全功率VSC型换流器组成。对于风机控制可以采用文献[15]中关于永磁直驱风机机侧换流器控制方法——转子磁场定向的矢量控制法。而在直流串并联结构中, 一个并联风机群中会有一台风机将被指定为主风机, 由其来控制并调整机群输出电压, 主风机的外环控制目标不是最大功率追踪而是直流电压; 其他风机有两种工作模式, 一种为正常工作模式, 换流器控制工作在最大功率追踪模式下, 控制外环目标由最大功率追踪算法得到输出功率, 另一种为恒压控制模式, 控制外环为控制直流侧电压恒定。由此可以得到直流串并联结构中风机控制框图如图2所示。

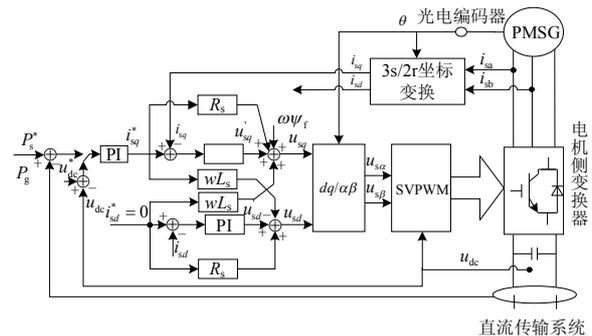


图2 永磁同步电机控制框图

Fig. 2 Control block diagram of PMSG

3 桨距角控制

风机桨距角的控制是对风机叶片迎风角度的控制。通过改变转矩角来改变叶片与风之间的角度, 改变风能转换机械效率, 从而使风机作用在电机转轴上的机械转矩变化, 使发电机输出的功率也跟着变化。不同桨距角下风力机输出的功率和风速的关系见图3所示。图中表示的是风机的工作风速为: 5~24 m/s, 图中实现表示风力发电机的输出功率。从图中可以看出在正常的工作模式下, 桨距角一直在0°工作, 保持最大迎风面, 接收最大风功率, 当风速超过额定风速以后, 可以看到输出曲线成恒

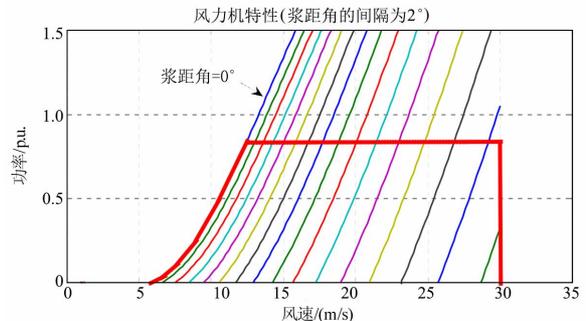


图3 风机输出功率与风速和桨距角的关系

Fig. 3 Relationship between output power of wind turbine and wind velocity, pitch angle

定值，此时桨距角不断调整，使风力机输出功率与发电机输出功率相平衡，保持风机稳定。

桨距角的控制系统一般情况下会由风能限制器和转速调节组成。图中 P_g 为风机所产生的功率； ω_m 为风力机转轴转速；含有上级“*”的为参考值。对 P_g 的控制器也就是风能限制器， ω_m 的控制器也就是转速调节器，这两者的控制量输出合并成为桨距角的指令参考值^[16-17]，如图 4 所示。

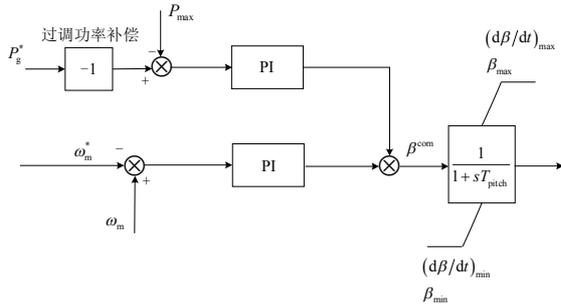


图 4 变桨距控制

Fig. 4 Control of the pitching system

4 直流串并联系统稳态特性

从图 1 中可以看出，直流传输系统的电流是受并网换流器控制的，而对于每一机群内部的电流和其并联电压并不受控制，是相对独立的，但是直流系统的电流间接地影响每个机群的电压值。忽略连接每个机群的电缆上的阻抗和感抗，可以得出

$$V_{\text{system}} = \frac{\sum P_{\text{cluster}x}}{I_{\text{system}}} \quad (1)$$

式中： V_{system} 为直流传输系统直流电压； I_{system} 为直流传输系统直流电流； $P_{\text{cluster}x}$ 是第 x 机群内并联风机功率之和。

由于并联的几台风机出口电压相同，所以每台风机的出口电流与每台风机的输出功率成正比。也就可以得出每台风机的输出电流为

$$\frac{P_{\text{cluster}x1}}{I_{\text{cluster}x1}} = \frac{P_{\text{cluster}x2}}{I_{\text{cluster}x2}} = \dots = \frac{P_{\text{cluster}xy}}{I_{\text{cluster}xy}} = V_{\text{cluster}x} \quad (2)$$

式中： $P_{\text{cluster}xy}$ 为第 x 簇里第 y 个风机的输出功率；而 $I_{\text{cluster}xy}$ 为第 x 簇中第 y 个风机换流器输出的电流。

5 直流串并联系统协调控制

5.1 系统稳态运行控制

在每个并联机群中任选一个作为主风机，由其控制机群的输出电压，其他风机按照各自的最大功率追踪控制；通过各风机接收的风能情况计算合适的系统串联电流，发给岸上换流站，由其控制系统

串联电流。

5.2 系统串联电流

从直流串并联系统的稳态运行特性可以看出，并联机群的出口电压由其机群内风机所接收风功率大小和系统串联电流所决定，由此如果各机群间风功率差比较大或者串联电流设定不当会造成机群达到电压上限而无法继续跟踪最大功率。会造成系统风功率损失。

为了尽量减小风能损耗，确定最优的串联电流，通过风速分布概率计算风能损耗率。尽管在海上风电场的范围不会太大，海平面较为平坦光滑，但是每台风机所接收到的风速还是不可能完全相同。风机机群所接收风速具有有随机性的差异，所以可以采用正态分布的函数来进行表述^[13]。当串联风机群 n 足够大，风速 v_w 分布函数 $f(v_w)$ 可用式(3)表示。

$$\begin{cases} f(v_w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(v_{w,i}-\mu)^2}{2\sigma^2}} \\ \mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_{w,i} \\ \sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_{w,i} - \mu)^2 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中： μ 是风场的平均风速； $v_{w,i}$ 是第 i 个风机群的平均风速； σ 是风场风速的均方差。分别设风电场平均风速是 8 m/s，当协方差分别为 0.5 m/s、1 m/s 和 2 m/s 时，风机机群概率分布如图 5 所示。

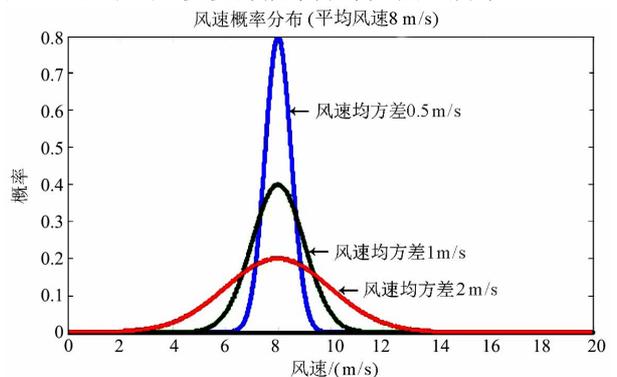


图 5 不同风速风机的分布

Fig. 5 Wind turbine distribution of different wind speed

当所有机群都正常工作时，其风场所能发出的有功功率为

$$P_{\text{full}} = \int_{v_{w,\text{cutin}}}^{v_{w,\text{rated}}} 0.5\rho\pi R^2 (v_w)^3 n f(v_w) d(v_w) + \int_{v_{w,\text{rated}}}^{v_{w,\text{cutoff}}} 0.5\rho\pi R^2 (v_{w,\text{rated}})^3 n f(v_w) d(v_w) \quad (4)$$

当需要有风机群限制功率输出时

$$P_{\text{out,cluster}} = \int_{v_{w,\text{cutin}}}^{v_{w,\text{limit}}} 0.5\rho\pi R^2(v_w)^3 nf(v_w)dv_w + \int_{v_{w,\text{limit}}}^{v_{w,\text{cutoff}}} 0.5\rho\pi R^2(v_{w,\text{limit}})^3 nf(v_w)dv_w \quad (5)$$

式(4)、式(5)中: $v_{w,\text{cutin}}$ 为风机切入风速; $v_{w,\text{rate}}$

$$k_{\text{loss}} = \frac{\int_{v_{w,\text{limit}}}^{v_{w,\text{rated}}} [(v_w)^3 - (v_{w,\text{limit}})^3] f(v_w)dv_w + \int_{v_{w,\text{rated}}}^{v_{w,\text{cutoff}}} [(v_{w,\text{rated}})^3 - (v_{w,\text{limit}})^3] f(v_w)dv_w}{\int_{v_{w,\text{cutin}}}^{v_{w,\text{rated}}} (v_w)^3 f(v_w)dv_w + \int_{v_{w,\text{rated}}}^{v_{w,\text{cutoff}}} (v_{w,\text{rated}})^3 f(v_w)dv_w} \quad (6)$$

根据式(6)可以得到风电场风能损失率和机群电压限定值的关系。可以设机群输出电压限定值为 1.2 pu, 风机切入风速为 5 m/s, 额定风速为 12 m/s, 切除风速为 24 m/s, 图 6 显示在平均风速为 8 m/s 的情况下, 系统直流电流的大小和机群损失功率的关系。

上面分析说明了对于直流并串联传输的风电场, 增大直流传输电流, 可以减小因限制输出而造成的风能的损耗。不过, 因为增大输电电流会增加传输线路上的损耗, 在一定程度上还会降低直流系统电压, 这样会降低并网侧换流器向电网输出无功的能力, 所以需要考虑风电场和电网各种条件因素后才能对系统串联电流进行调整。

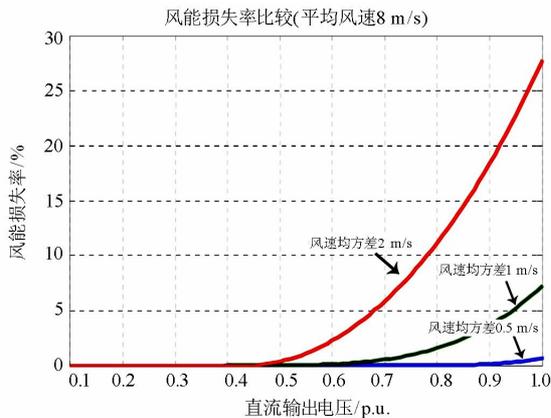


图 6 机群电压限制值和风能损失率的关系

Fig. 6 Power loss under changing the limited DC voltage

5.3 系统低电压穿越控制

现在具备低电压穿越能力是风电场并网的必要条件^[17-19]。直流传输风电场处理低电压穿越问题: 风电场所发出电能无法发送到电网, 由此直流传输系统中会有能量积聚, 导致直流侧电压升高, 如果不采取措施电压将超过额定值造成系统损坏。在电网出现电压跌落故障时, 维持直流系统电压不超过额定值, 同时风电场风机不脱离系统停止工作是直

为额定风速; $v_{w,\text{cutoff}}$ 为风机退出风速; $v_{w,\text{limit}}$ 为限制电压下的切换风速。

根据前面两个等式, 可得到机群所损失的风功率和可输出的功率的比例关系如式(6)所示。

流传输的风电场低电压穿越控制所需要解决的问题。由前面风机换流器的控制可知, 风机机群输出电压超过电压上限时就会停止上升, 此时不仅是主风机, 机群内所有风机都进入恒电压控制。此时风机输出功率小于风机输入功率, 风机转速加快, 风机转速如果过快, 超过限定值时, 桨矩角控制将会启动, 减少风能输入^[20], 这时直流系统的电压可用式(7)表示。

$$V_{\text{system}} = \sum_{x=1}^n V_{\text{max},x} \quad (7)$$

式(7)中, $V_{\text{max},x}$ 是风电机组 x 的输出电压上限值。

这个时候风电场所有的风机应该都工作在控制直流电压稳定的模式下, 直流侧电压可以保持稳定, 但是由于全部机群都在电压上限工作, 其总和可能会稍大于直流系统的额定值, 为了避免系统器件受到损坏, 可以根据风机各机群输出功率的情况调整电机机群输出电压的上限, 这样让全部机群上限电压相加刚好等于直流系统电压的保护值, 这样便可以达到控制直流系统电压的目的, 也便是实现了低电压穿越功能。此方法实现低电压穿越充分利用了直流输电系统内的储能元件和风机自身惯性的储能作用, 避免了安装额外电路, 降低了风电场建设成本^[21]。

6 系统仿真试验

由于风电场控制实验需要多个风机接入才能达到风电场特性模拟的目的, 考虑到仿真的复杂度和仿真时间, 可以对风机进行适当的简化。简化模型保持风机原有外特性, 不会影响风电场仿真结果, 可以更专注于风电场的特性分析与控制研究^[22-25]。根据永磁直驱风机外特性, 可以用风力机模型加受控源来简化永磁直驱风机^[26]。利用简化风机模型搭建风电场模型如图 7 所示。

永磁同步风机参数:

(1) 风力机。风力额定功率 5 MW; 风力额定转

速 1.55 rad/s; 风力机惯性系数 $1.06 \times 10^7 \text{ kgm}^2$, 额定风速 12 m/s。

(2) 永磁电机。额定功率 5 MW; 额定频率 35.77 Hz; 转子额定转速为 224.75 rad/s; 电机感应电动势 $2.31 \text{ kV}_{LN}^{\text{RMS}}$; 同步感抗 4.33 mH; 定子阻抗 72.2 mΩ; 永磁磁链 $1454 \times 10^4 \text{ V}\cdot\text{s}$ 。

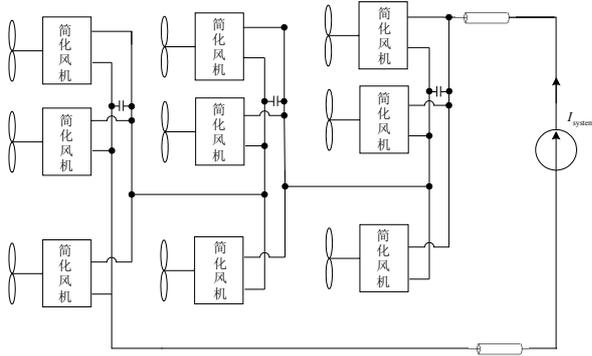


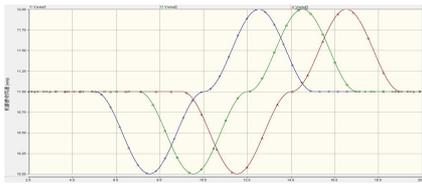
图 7 风电场仿真电路图

Fig. 7 Simulation model of the wind farm

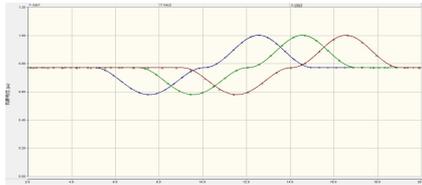
换流器直流侧电容: 9 mF。

1) 最大功率追踪实验

设初始状态三个风机集群模块接收的风速都为 11 m/s, 在运行到 5 s 以后三个风机群接收到的风速发生改变。设定系统串联电流参考值为 1.0 p.u.。



(a) 各机群接收到的风速



(b) 各机群输出电压

图 8 风电场最大功率追踪实验波形图

Fig. 8 Waveforms of wind farm MPPT experiment

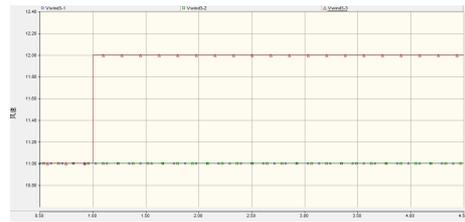
从图 8 实验波形可以看出三个机群电压都能跟随风速的变化而变化, 输出功率可以跟踪风机接收风能最大功率。

2) 系统串联电流调整实验

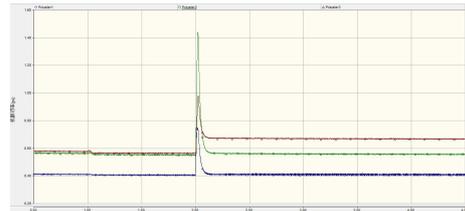
在风电场稳定运行过程中, 因为出现了风能损失而进行系统串联电流调整。机群 1 的三台风机接收风速分别为: 10 m/s、9 m/s、8 m/s, 机群 2 的三

台风机接收的风速分别为: 12 m/s、10 m/s、11 m/s, 机群 3 的三台风机接收的风速都为: 11 m/s; 三个机群电压上限为 1.0 p.u.。在稳定运行到 1 s 时, 编号 3-3 风机接收风增大到 12 m/s, 仿真运行到 2 s 时系统电流增大, 从 0.6 p.u.增大到 0.7 p.u.。

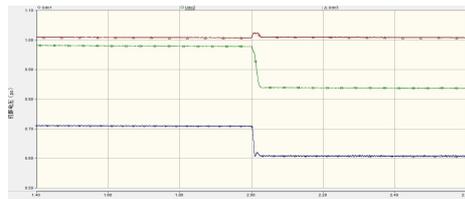
从图 9 中可以看出, 开始稳定运行后机群 3 的输出电压已经到了上限值, 当风速增大时, 机群 3 的输出功率并没有增加。在这种情况下, 系统串联电流进行调整。可以从实验波形看到, 当仿真运行到 2 s 时系统串联电流增大, 机群 1 和机群 2 的电压下降, 但输出功率没有变化, 而机群 3 的电压基本没有变化, 输出功率增大。从实验中可以看出增大系统串联电流可以减少由于机群电压达到限制值而造成的风能损失。



(a) 机群 3 风机接收的风速



(b) 各机群输出功率



(c) 各机群输出电压

图 9 系统串联电流调整实验波形

Fig. 9 Waveforms of changing the system current experiment

3) 低电压穿越实验

设风机机群 1、2、3 中的风机接收风速分别为 10 m/s、10.5 m/s、11 m/s, 机群输出电压上限都为 1.0 p.u., 风机转速上限为 1.1 p.u.。在 10 s 时刻, 直流侧的开关断 S1 打开 200 ms。

从图10中可以看出当电网发生故障后, 直流侧电压会迅速上升, 在直流电压没有达到电压限定值时, 输出功率保持平稳; 当电压到达电压限定值后, 输出功率会随着电压上升有一个向上的波动; 随着电压上升超电压限制值, 所有风机进入电压限制模

式, 各机群直流电压都被控制在1.0 p.u.左右, 此时输出功率快速下降, 直至接近于0点; 此时风机输入功率大于输出功率, 风机转速加快, 可以从转速最快的机群3中风机转速图中看出, 由于风机整体惯性, 在短时间内没有上升到风机转速限定值, 转矩角控制没有启动; 当故障消除后风机逐渐恢复正常工作。从此过程可以看出, 通过风电场控制和风机自身控制, 风电场可以达到低电压穿越的要求。

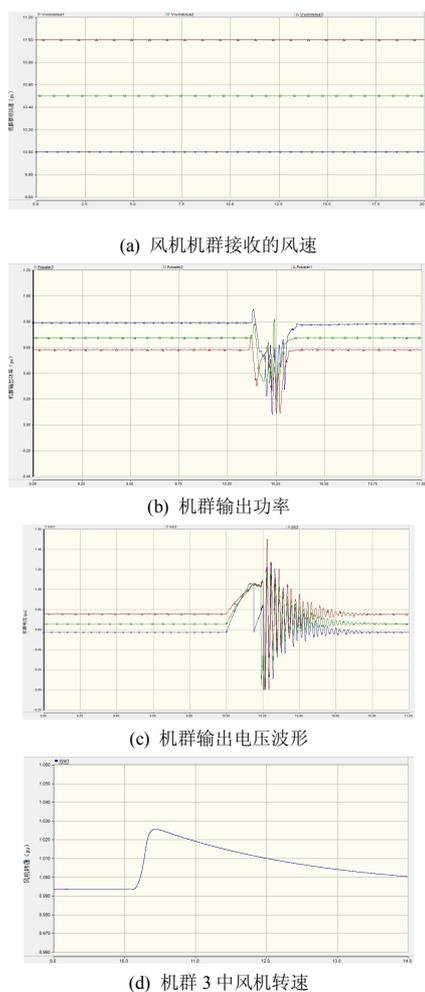


图 10 故障实验波形图

Fig. 10 Waveforms of LVRT experiment

7 结论

本文提出应用于海上风电场传输的直流串并联拓扑结构, 此结构能够避免集中式变压器和换流器的使用减少海上风电场的建设成本, 并且能够较为灵活地控制风机实现最大功率追踪和故障处理。同时本文还提出了基于直流串并联结构风机组协调控制策略。通过软件仿真实验可以看出此拓扑能够稳定运行; 协调控制算法可以控制风机实现最大功率

跟踪, 同时通过对风电机组电压调整和风机自身控制相结合实现了低电压穿越控制。

参考文献

- [1] MOSKALENKO N, RUDION K, ORTHS A. Study of wake effects for offshore wind farm planning[C] // Modern Electric Power Systems (MEPS), 2010 Proceedings of the International Symposium, September 20-22, 2010: 1-7.
- [2] DENG Fujin, CHEN Zhe. An offshore wind farm with DC grid connection and its performance under power system transients[C] // Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE, July 24-29, 2011: 1-8.
- [3] 尹明, 王成山, 葛旭波, 等. 中德风电发展的比较与分析[J]. 电工技术学报, 2010, 24(9): 157-162, 182.
YIN Ming, WANG Chengshan, GE Xubo, et al. Comparison and analysis of wind power development between China and Germany[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 24(9): 157-162, 182.
- [4] NAN Qin, SHI You, ZHAO Xu, et al. Offshore wind farm connection with low frequency AC transmission technology[C] // Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE, July 26-30, 2009: 1-8.
- [5] Europe Wind Energy Association. Wind in our sails[R]. 2011: 11-31.
- [6] 文劲宇, 陈霞, 姚美齐, 等. 适用于海上风场并网的混合多端直流输电技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 55-61.
WEN Jinyu, CHEN Xia, YAO Meiqi, et al. Offshore wind power integration using hybrid multi-terminal HVDC technology[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 55-61.
- [7] DENG Fujin, CHEN Zhe. An offshore wind farm with DC grid connection and its performance under power system transients[C] // Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE, July 24-29, 2011: 1-8.
- [8] 刘亚磊, 李兴源, 曾琦, 等. 多端多电平柔性直流系统在海上风电场中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 9-14.
LIU Yalei, LI Xingyuan, ZENG Qi, et al. VSC-MTDC system based on MMC for offshore wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 9-14.
- [9] LU W, OOI B T. Optimal acquisition and aggregation of

- offshore wind power by multiterminal voltage-source HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 201-206.
- [10] CHEN Z, SPOONER E. Grid power quality with variable speed wind turbines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2001, 16(2): 148-154.
- [11] MEYER C, HOING M, PETERSON A, et al. Control and design of DC grids for offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(6): 1475-1482.
- [12] 李响, 韩民晓. 海上风电串联多端VSC-HVDC协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 27(5): 42-48, 57.
LI Xiang, HAN Minxiao. A coordinated control strategy of series multi-terminal VSC-HVDC for offshore wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 27(5): 42-48, 57.
- [13] 何大清. 基于直流串联的海上风电场及其控制[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
HE Daqing. Series-connected DC based offshore wind farm and its control[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [14] SHADI C, AHMADREZA T. Matrix interconnected topology for dc collector systems of offshore wind farms[C] // Renewable Power Generation (RPG 2011), IET Conference on, September 6-8, 2011: 1-4.
- [15] 瞿兴鸿. 直驱永磁同步风力发电控制系统的研究与设计[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
QU Xinghong. Study and design of direct-driven permanent magnet synchronous wind-energy generation control system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [16] 陈波, 吴政球. 双馈感应风力发电机强迫功率振荡的频域分析法[J]. 电力自动化设备, 2012, 40(11): 15-22.
CHEN Bo, WU Zhengqiu. Frequency domain analysis of forced power oscillation induced by doubly-fed induction generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 40(11): 15-22.
- [17] 李戈, 宋新甫, 常喜强. 直驱永磁风力发电系统低电压穿越改进控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 74-78, 83.
LI Ge, SONG Xinfu, CHANG Xiqiang. Improved control theory for low voltage ride-through of permanent magnet synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 74-78, 83.
- [18] 吴杰, 孙伟, 颜秉超. 应用STATCOM提高风电场低电压穿越能力[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 47-51, 71.
WU Jie, SUN Wei, YAN Bingchao. Improvement of low voltage ride through capability of wind farm using STATCOM[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 47-51, 71.
- [19] 蔚兰, 陈宇晨, 陈国呈, 等. 双馈感应风力发电机低电压穿越控制策略的理论分析与实验研究[J]. 电工技术学报, 2011, 25(7): 30-36.
YU Lan, CHEN Yuchen, CHEN Guocheng, et al. A low voltage ride-through control strategy of doubly fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 25(7): 30-36.
- [20] 刘鹏飞, 卢勇, 莫旭杰, 等. 并网新标准下的双馈风机“软穿越”能力的实现[J]. 大功率变流技术, 2013(3): 55-57.
LIU Pengfei, LU Yong, MO Xujie, et al. Realization of “soft-ride-through” ability under the new grid-connected standards for doubly-fed induction wind generator[J]. High Power Converter Technology, 2013(3): 55-57.
- [21] LIU Jian, LIANG Haifeng, LI Wei, et al. Research on low voltage ride through capability of wind farms grid integration using VSC-HVDC[C] // Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), 2012 IEEE, May 21-24, 2012: 1-6.
- [22] PERDANA A. Dynamic models of wind turbines[D]. Goteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2008: 137-163.
- [23] LU Weixing. Control and application of multi-terminal HVDC based on voltage-source converter[D]. Montreal: McGill University, 2003: 42-46.
- [24] MAX L. Energy evaluation for DC/DC converters in DC-based wind farms[D]. Goteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2007.
- [25] ROBINSON J, JOVIC D, JOOS G, et al. Analysis and design of an offshore wind farm using a MV DC grid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 25(4): 2164-2173.
- [26] VEILLEUX, ETIENNE. Interconnection of direct-drive wind turbines using a series connected DC grid[D]. Toronto: University of Toronto, 2009.

收稿日期: 2014-04-24; 修回日期: 2014-05-26

作者简介:

李响(1979-), 男, 博士, 研究方向为风力发电系统及其并网控制; E-mail: xiang.lee.c@gmail.com

韩民晓(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。