

基于 VSC-HVDC 并网风电场的低电压穿越技术研究

章心因^{1,2}, 胡敏强¹, 吴在军¹, 郝思鹏²

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 南京工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要: VSC-HVDC 系统应用于大规模风电集中并网、远距离输送时, 要解决电网故障时风电场的低电压穿越 (LVRT) 问题。为此, 提出 VSC-HVDC 系统与风电场的协调控制策略。低电压穿越期间, 通过 HVDC 两端变流站对电网提供无功支持并采用基于频率控制的快速功率降低算法控制风电场馈入功率, 维持直流线路功率平衡。同时, 提出风电机组分层控制, 使之与 HVDC 功率控制相协调, 保持风电机组的电压稳定。VSC-HVDC 系统与风电场间无需通信连接, 无需增加设备投资, 具有较好的经济性。最后, 算例仿真结果验证了该控制策略的快速性和有效性。

关键词: 风电场; VSC-HVDC; 低电压穿越; 协调控制; 分层控制

Research on the low voltage ride-through technology of integrated wind farms based on VSC- HVDC

ZHANG Xin-yin^{1,2}, HU Min-qiang¹, WU Zai-jun¹, HAO Si-peng²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: When VSC-HVDC system is applied in wind power integration and long-distance transportation, low voltage ride-through (LVRT) in power grid fault is the main technical problem. A LVRT coordinated control strategy is proposed for the VSC-HVDC based wind farms. During LVRT period, the HVDC converters provide reactive current to the grid and control the output power of wind farm through the quick power reduction method which is based on frequency control, to maintain the power balance of DC system. The wind turbine power control is improved and hierarchical control is designed to make it in harmony with the HVDC control and keep the voltage stability of the wind turbines. Coordinated control strategy without communication connection between HVDC system and wind farms, without increasing investment in equipment, has a good economy. Results of case simulation verify the quickness and effectiveness of the proposed method.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A107) and National Natural Science Foundation of China (No. 51177015 and No. 51077068).

Key words: wind farm; VSC-HVDC; LVRT; coordination control; hierarchical control

中图分类号: TM614 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)19-0093-07

0 引言

VSC-HVDC 直流输电技术可以解决大规模风电的集中并网、远距离输送问题, 但当前电网对大型风电场的故障穿越能力提出了严格的要求^[1], 这对 VSC-HVDC 系统也是一个挑战性的任务。由于 REC 变流站在电网故障时注入的能量受限, 由此产

生的功率不平衡使得直流线路中的电容充电, 导致直流电压升高, 甚至可能损坏 HVDC 设备^[2]。因此, 对基于 VSC-HVDC 风电系统的低电压穿越技术的研究, 越来越引起研究人员的关注。

文献[3]通过在 HVDC 线路上加装直流卸荷及储能电路, 消纳故障期间不平衡功率, 维持直流电压稳定。但需采用全功率器件, 成本较高, 且受到耗能电阻热容量的限制^[4]; 文献[5]通过增大变流器及直流电容额定容量, 多个并联安装, 使其可通过更大电流。但考虑到成本, 增加的容量是有限的。在长时间和严重故障下, 功率不匹配仍有可能超出

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目 (863 计划) (2011AA05A107); 国家自然科学基金项目 (51177015, 51077068); 江苏省产学研前瞻性联合研究项目 (BY2010142); 江苏教育厅自然科学基金项目 (12KJB470006)

器件容量,因此这种方法较适用于短时的电压跌落故障;文献[6]提出基于直接通信的快速功率降低方法。在 HVDC 与风电机组间装设通信线路,当 REC 站检测到故障时,将信号发送给 SEC 站和风电场,通过机组变流器减小功率输出。缺点是通信延迟及可靠性可能影响控制的效果。

上述方法存在明显缺陷,不能可靠、经济地实现基于 VSC-HVDC 并网风电场的 LVRT 要求。本文对 VSC-HVDC 系统与风电场运行控制进行改进,提出故障期间 HVDC 变流站及风电机组的协调控制策略,并结合风电机组功率控制要求,提出分层控制算法。最后通过仿真验证了所提出方法的有效性。

1 系统概述

基于 VSC-HVDC 并网风电场的模型如图 1 所示。HVDC 系统采用典型的端到端结构^[7]。风电场选用直驱式 PMSG 机组,背靠背双 PWM 变流器结构^[8]。

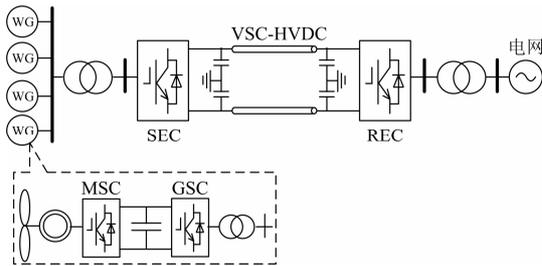


图 1 VSC-HVDC 风电系统模型
Fig. 1 Wind power system based on VSC-HVDC

1.1 风电机组控制

PMSG 机组控制原理如图 2 所示。电机侧变流器 MSC 控制发电机转速,实现最大风能跟踪,采用功率外环、电流内环的级联控制结构^[9];网侧变流器 GSC 维持机组直流电压稳定,无功控制可用于电网电压的支持,但此处并不使用以避免与 SEC 变流站的电压控制策略相冲突。

1.2 VSC-HVDC 控制

VSC-HVDC 系统由风电场侧送端站 SEC、电网侧受端站 REC 和直流线路组成,两侧均有直流电容提供稳定的直流电压,控制原理如图 3 所示。

SEC 控制风电场出口电压,并可直接调控频率,为风电场提供一个给定幅值和频率的电压参考点。其电压和频率调节能力同样可以用来控制风电场的输出功率,在电网故障期间减少有功传输^[10]; REC 稳态运行时维持直流线路电压稳定,将 SEC 传送的功率注入电网,此时有功电流具有较高的优先

级^[11]。有功无功电流基于电网电压矢量定向实现解耦,并采用动态响应良好的前馈电流控制^[12]。

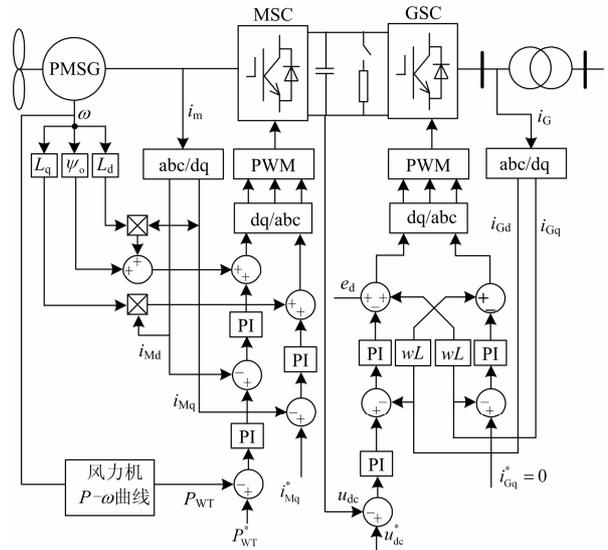


图 2 风电机组控制原理图
Fig. 2 Control diagram of PMSG

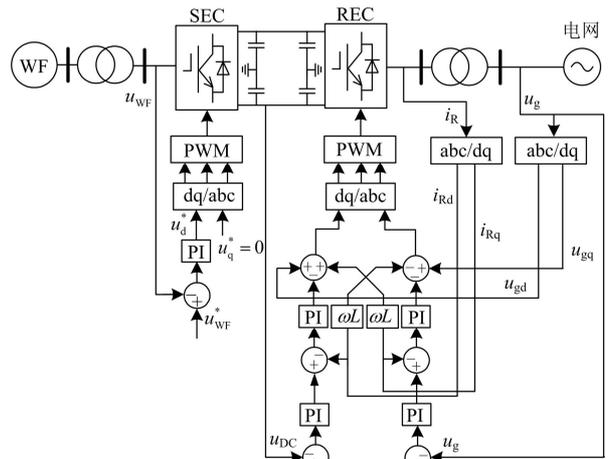


图 3 VSC-HVDC 控制原理图
Fig. 3 Control diagram of VSC-HVDC

2 LVRT 协调控制

LVRT 协调控制是指电网故障期间,基于 VSC-HVDC 的风电系统在对电网提供无功支持的基础上,通过协调 HVDC 变流站和风电机组的控制策略,快速减少风电场发电功率解决功率不平衡问题,实现低电压穿越。

2.1 REC 控制

基于 VSC-HVDC 并网风电场的无功支持是由电网侧 REC 站完成的。当电网发生电压跌落时,REC 切换到无功电流优先,以满足 LVRT 要求的电

压支撑。根据无功电流与电网电压支撑的特性, 电网电压每跌落1%的额定电压, 风电系统需向电网发出2%额定电流大小的无功电流^[13]。

$$i_{Rq} = \begin{cases} 2(u_g - u_g^*), & \text{if } |u_g - u_g^*| \leq 0.5 \text{ p.u.} \\ -1 \text{ p.u.}, & \text{if } |u_g - u_g^*| > 0.5 \text{ p.u.} \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_{Rq} 为REC无功电流; u_g^* 为故障前REC电网侧交流电压。

有功电流则限制为

$$i_{Rd} = \sqrt{i_{R,lim}^2 - i_{Rq}^2} \quad (2)$$

式中, i_{Rd} , $i_{R,lim}$ 分别为 REC 有功电流、额定电流幅值极限标么值。

此时可传输最大功率为

$$P_{g,max} = u_g \cdot i_{Rd} \quad (3)$$

因此, 无功电流优先将使有功电流减小, 且由于电网电压跌落, REC 站只能将发电功率的一小部分送入电网。SEC 站因不能及时测得故障仍按故障前功率注入, 而此时风电场接近额定功率运行, 则 REC 和 SEC 两站间由于严重的功率不平衡将导致直流线路电压骤升。这是基于 VSC-HVDC 并网风电场在 LVRT 期间存在的主要问题^[14]。

2.2 SEC 控制

SEC 站具有较强的控制能力, 可以通过对电压、电流、频率等参数进行调节从而间接地降低风电场的输出功率。下面介绍基于频率控制的快速功率降低策略, 控制结构如图 4 所示。

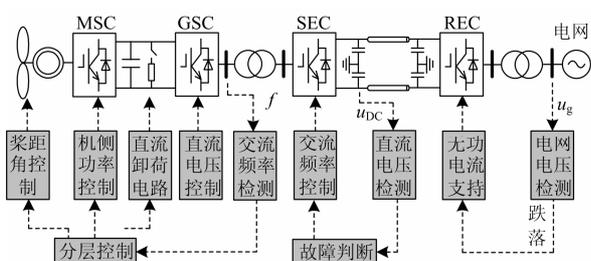


图 4 LVRT 协调控制结构图

Fig. 4 LVRT coordinated control structure diagram

为了实现功率控制的快速性, 首先提出一种新型故障判别方法。正常运行时, 直流线路电压由 REC 控制, 其变化范围是有限的; 故障期间, 将超出其正常范围, 因此, 可以将直流线路电压作为判定电网故障的依据。通过在线路上装设直流电压测量装置检测故障, 并在 SEC 控制中增加直流电压控制。由于无需 REC 和 SEC 两站间的通信, 消除了通信延迟, 这点尤为重要。为了避免与其控制相冲

突, 故障期间 REC 直流电压控制应退出。

图 5 所示为 SEC 改进后的控制。SEC 根据功率-频率特性控制风电场交流电网频率在额定值附近小范围内改变, 通过增加频率来降低风电场输出功率。当直流电压超过设定限值时启动。这种方法主要针对装备电力电子变换器的变速风电机组, 优点是通过电气频率传递信号, 不需要与机组通信。但该方法也有一些缺点:

第一, 由于交流频率对风机的功率并无直接控制, 因此需要在风机 MSC 功率控制器中附加一个频率控制环(如图 6 所示), 否则输出功率将无法对频率改变做出反应。当风机检测到异常的频率变化, 其功率控制应从最大风能跟踪转换为基于频率控制的快速功率降低。

第二, 通过 MSC 频率控制降低发电功率, 将使 PMSG 转子加速, 脱离最大风能跟踪曲线, 部分风能转化为动能储存在风轮中。当电压跌落严重且持续时间较长, 发电机转速达到上限将仍不能满足要求, 必须通过其他方法继续降低机组的发电功率。

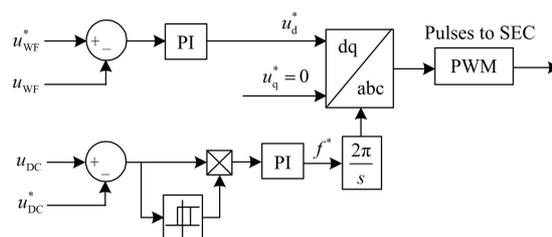


图 5 SEC 变流站协调控制原理图

Fig. 5 Coordinated control diagram of SEC

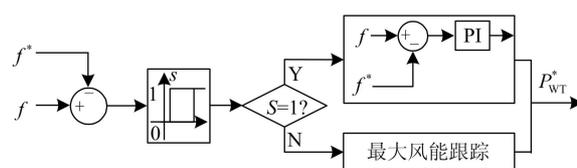


图 6 基于频率的 MSC 功率控制

Fig. 6 MSC power control based on frequency

2.3 风电机组分层控制

针对上述情况, 频率控制需要一定的响应时间, 且转速上限限制了功率降低的额度, 可能造成直流侧过压, 风电机组应采取措施快速减少风机发电功率。可用的降低功率方法有桨距角控制、直流卸荷电路等^[15]。桨距角控制能从根本上减少风能吸收, 但响应速度慢, 每秒变化最大值为 $10^\circ \sim 20^\circ$, 只能作为其他方法的辅助; 直流卸荷电路, 控制简单, 响应迅速, 但长时间运行可能导致电阻温度超过安全设定值。表 1 为两种方法的比较。

表 1 风电场功率控制方法

Table 1 Power control methods of wind farm

控制策略	作用	缺点
桨距角控制	减少风能捕获	响应时间
直流卸荷电路	防止直流过电压	卸荷电阻散热、成本

这两种方法受电压跌落程度和持续时间的影响,可在不同故障情况下与 MSC 基于频率的功率控制相互补充,形成分层控制^[16]。由 MSC 功率控制构成第 1 层控制,桨距角控制与直流卸荷电路相结合构成第 2 层控制,确保直流电压稳定。具体工作原理为:当风电场交流频率上升超过设定值时启动第 1 层控制,通过 MSC 功率控制使 PMSG 转子加速,降低发电功率;当电压跌落较为严重,发电机转速达到上限仍不能满足要求时,启动第 2 层控制,采用紧急变桨控制,迅速增加风力机桨距角,快速减小所捕获的风能,控制原理如图 7 所示;期间配合直流卸荷电路,以避免由于桨距角变化较慢而出现的直流母线短时过电压。当直流母线电压 u_{dc} 超过限值 1.1 p.u. 时,开关导通,投入卸荷电阻,如图 8 所示。由于本文中风机 GSC 变流器无需提供无功支持,其全部容量可用于有功输出,从而降低了直流卸荷电路的压力,故机组只需加装部分功率的卸荷电阻。

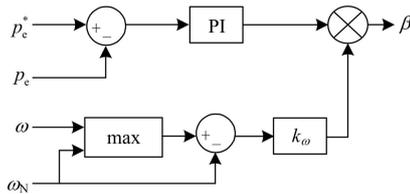


图7 桨距角控制图

Fig. 7 Control diagram of pitch angle

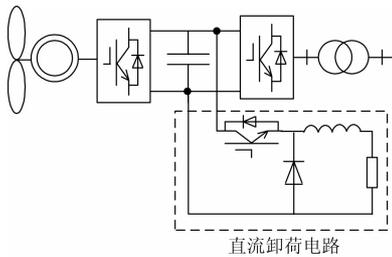


图8 PMSG的直流卸荷电路

Fig. 8 Buck circuit of PMSG

此处将 REC 变流器电流 I_R 上限设为额定值的 1.2 p.u., 直流线路电压 u_{DC} 限值设为 1.05 p.u., 风电场频率 f 上限设为 1.03 p.u., 发电机转速 ω 上限设为 1.4 p.u.。如表 2 所示,由式(1)~式(3)可求出,当电网电压 u_g 低于 0.86 p.u. 时,REC 变流

器电流达到上限;当直流线路电压超过 1.05 p.u. 时,触发 SEC 站频率控制,通过提高风电场电网频率降低输出功率;当风电场频率超过 1.03 p.u. 时,启动分层控制;由于发电机转速变化有一定的惯性,第 2 层控制的转速阈值设为 1.3 p.u.。LVRT 协调控制总体流程如图 9 所示。

表 2 LVRT 分层控制策略

Table 2 LVRT hierarchical control

参数值	LVRT 协调控制策略
$u_g \leq 0.86$ p.u.	REC 变流器电流达到上限 1.2 p.u.
$u_{DC} > 1.05$ p.u.	SEC 启动频率控制
$f > 1.03$ p.u.	MSC 启动基于频率的功率控制
$\omega > 1.3$ p.u.	启动变桨控制
$u_{dc} > 1.1$ p.u.	启动直流卸荷电路

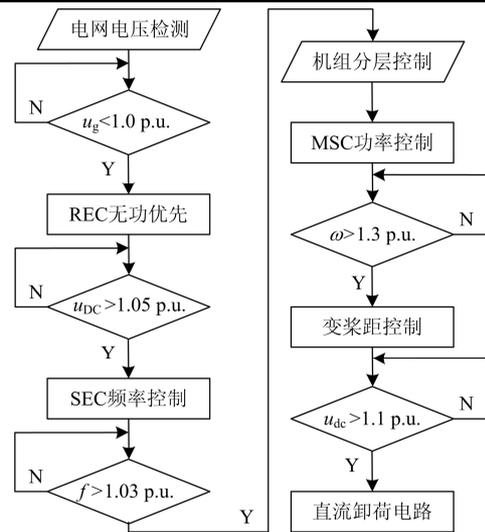


图9 LVRT协调控制流程图

Fig. 9 LVRT coordinated control flow diagram

3 仿真分析

应用 Matlab/Simulink 搭建模型进行仿真分析。系统参数为:风电场装机容量 10 MW,由 1 台 PMSG 机组等效;机组变流器容量 10 MVA,直流侧电容 20 mF, $u_{dc}^* = 1600$ V, 出口线电压 690 V, 电抗器 $L_g = 1.3$ mH, 变压器 690 V/10 kV, 容量 50 MW; HVDC 变流站容量 10 MVA, 直流侧电容 250 mF, $u_{DC}^* = 20$ kV, 直流线路长 10 km, 电网侧电压 10 kV, 风电场侧电压 10 kV。

如图 10 所示,0.15 s 之前,风力发电机以额定转速,单位功率因数运行,系统有功输出为 1 p.u.; 0.15 s 时电网电压跌落至 0.75 p.u.,持续 100 ms; 0.25 s 时电网电压跌落至 0.2 p.u.,持续 650 ms; 0.9 s 后,电网恢复正常,系统恢复额定运行状态。

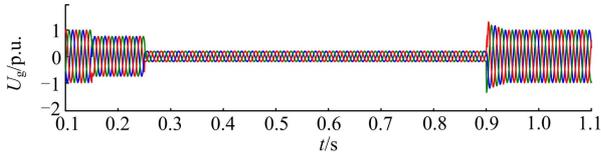


图 10 电网电压跌落

Fig. 10 Grid voltage drop

如图 11 所示, 当电压跌落至 0.75 p.u.时, REC 站开始对电网提供无功 0.375 p.u., 电流达到上限, 有功输出为 0.818 p.u.; 当电压跌至 0.2 p.u.时, REC 发出无功 0.24 p.u., 而由于电压下降及无功优先, 有功输出完全受限。

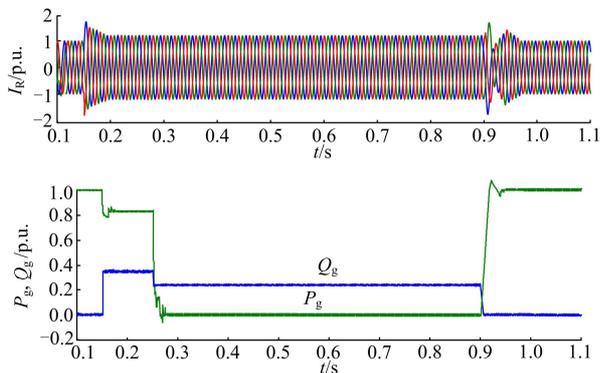
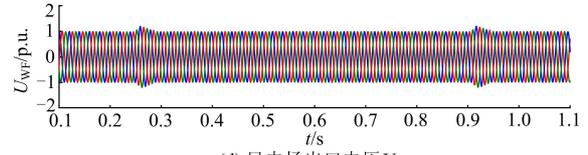
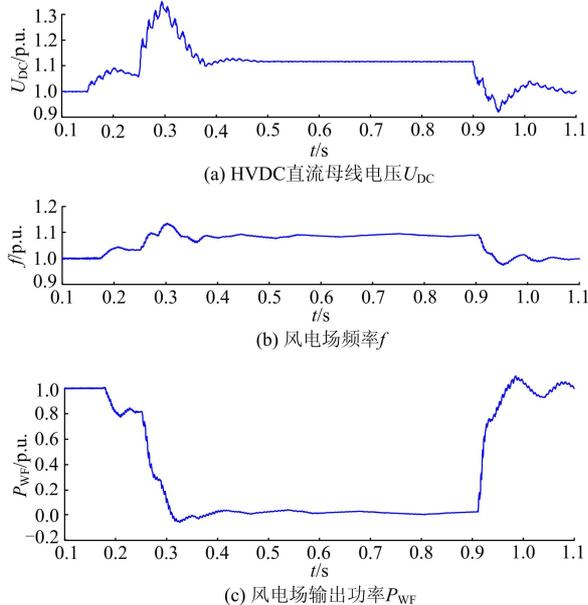


图 11 REC 变流站电流 I_R 、有功功率 P_g 和无功功率 Q_g

Fig. 11 REC current I_R , active power P_g , and reactive power Q_g

图 12 描述了 SEC 站协调控制的仿真结果。当电网电压跌落时, HVDC 直流母线电压逐渐升高超过了 1.05 p.u., SEC 频率控制被触发, 风电场电网频率升高, 风电场输出功率随之降低, 较好地稳定了直流母线电压。



(d) 风电场出口电压 U_{WF}

图 12 SEC 协调控制

Fig. 12 SEC coordinated control

图 13 是风电机组分层控制的情况。当电网电压跌落至 0.75 p.u.时, 风电场交流频率受 SEC 站控制升高超过了 1.03 p.u., 分层控制第 1 层启动, 发电机加速降低发电功率, 期间机组直流侧电压有短暂上升; 当电网电压跌至 0.2 p.u.时, SEC 进一步调高风电场频率, 发电机转速达到 1.3 p.u.仍不能满足系统能量平衡的要求, 第 2 层控制启动, 变桨机构动作, 由于变桨控制有一定延迟, 期间直流电压不断上升, 超过 1.1 p.u.时, 触发直流卸荷电路, 消耗多余的能量, 维持直流电压稳定。

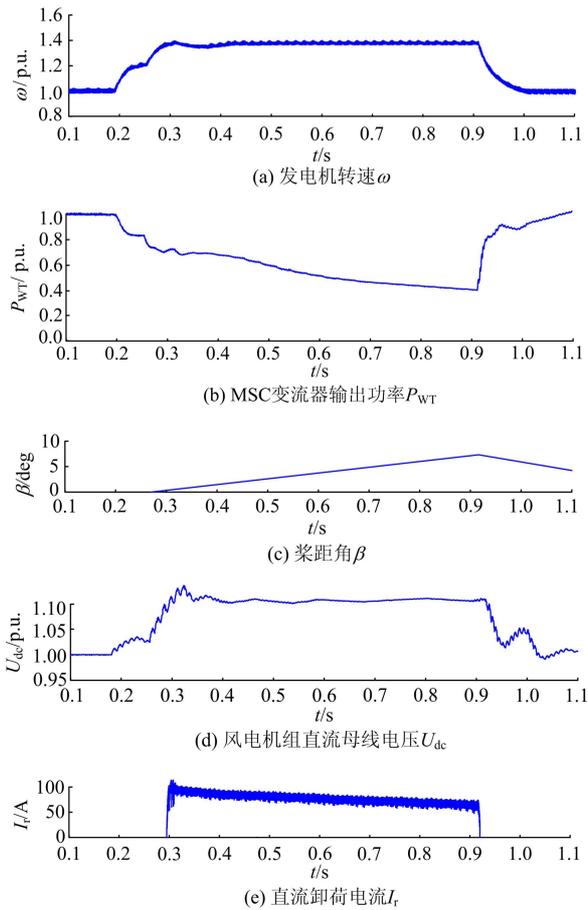


图 13 风电机组分层控制策略

Fig. 13 Wind turbine hierarchical control

从电网电压不同程度跌落的仿真情况可看出:
1) 协调控制策略通过升高风电场电网频率, 有

效减少注入功率,抑制 HVDC 系统功率不平衡,稳定直流线路电压;能在电压跌至 20%持续时间 625 ms 的最严重情况下实现系统的不脱网运行。

2) 采用直流线路电压作为电网故障的判据,消除了通信延迟;HVDC 变流站与风电场间无需通信连接,具有较好的快速性和可靠性;但由于频率测量和功率变化的速度较慢,直流线路电压仍有较高的超调,大约为标称值的 130%。

3) 基于频率的机侧功率控制通过使发电机加速,减少发电功率,但受到转速上限限制。PMSG 为多极低速风机,转速变化范围较大,但也只能短暂运行在额定转速的 1.4 p.u.左右。

4) 变桨控制与直流卸荷电路相结合具有较好的控制效果和响应速度。变桨控制可以有效减少风能捕获,但响应较慢,直流卸荷电路控制简单,反应迅速,将两者结合使用不仅可避免风电机组直流母线过电压,且大幅降低了对卸荷电阻参数的要求,相比在 HVDC 直流线路上装设全功率斩波电路具有更好的经济性。

4 结论

本文针对基于 VSC-HVDC 的风电系统在 LVRT 期间存在的主要问题,根据 HVDC 变流站与风电机组变流器的运行控制原理,设计了协调控制策略,并结合风电机组 LVRT 技术提出分层控制策略,可靠地实现了低电压穿越。

1) VSC-HVDC 与风电场的协调控制和分层控制是完全可行的。电网正常时,风电场通过 VSC-HVDC 系统集中并网,可以解决大规模风电远距离输送问题;电网故障时,不仅能够按照国际风电标准向电网提供无功支持,还能根据电网电压跌落深度,采用协调控制及多种控制方式相配合的分层 LVRT 策略,快速减少风电场发电功率,维持系统能量平衡和直流线路电压稳定,实现风电系统的低电压穿越,并尽量减少了对直流卸荷电阻的要求。

2) 协调控制策略操作简单,只需对变流器的控制算法稍作修改,不需要增加任何设备,并在同一系统内把风电直流并网、无功补偿、低电压穿越功能结合在一起,提高了系统的电压稳定性和电能质量,有较高的性价比和利用率;并且对 VSC-HVDC 各种拓扑结构均能适用,具有较好的移植性。

参考文献

[1] 贺益康,周鹏. 变速恒频双馈异步风力发电系统低电压穿越技术综述[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9):

140-146.

HE Yi-kang, ZHOU Peng. Overview of the low voltage ride-through technology for variable speed constant frequency doubly fed wind power generation systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 140-146.

[2] 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 Xin-fu, CHANG Xi-qiang. 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.

[3] 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, 28(5): 42-48.

LI Xiang, HAN Min-xiao. A coordinated control strategy of series multi-terminal VSC-HVDC for offshore wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 42-48.

[4] 刘胜文,包广清,范少伟. PMSG 无功控制和低电压穿越能力的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 135-140.

LIU Sheng-wen, BAO Guang-qing, FAN Shao-wei. Research on reactive power control and the low-voltage ride-through capability of PMSG[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 135-140.

[5] XU L, YAO L, SASSE C. Grid integration of large DFIG-based wind farms using VSC transmission[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(3): 976-984.

[6] 李和明,董淑惠,王毅,等. 永磁直驱风电机组低电压穿越时的有功和无功协调控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 73-81.

LI He-ming, DONG Shui-hui, WANG Yi, et al. Coordinated control of active and reactive power of PMSG-based wind turbines for low voltage ride through[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 73-81.

[7] 张少康,李兴源,王渝红. HVDC 附加控制策略对频率稳定性的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(19): 100-103, 109.

ZHANG Shao-kang, LI Xing-yuan, WANG Yu-hong. Research on the effect of HVDC additional control strategy on frequency stability[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(19): 100-103, 109.

[8] FELTES C, WREDE H, KOCH F, et al. Enhanced fault ride-through method for wind farms connected to the grid through VSC-based HVDC transmission[J]. IEEE Trans

- on Power Systems, 2009, 24(3): 1537-1546.
- [9] 李建林, 徐少华. 直接驱动型风力发电系统低电压穿越控制策略[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(1): 29-33.
LI Jian-lin, XU Shao-hua. Control strategy of low-voltage ride-through for direct-drive wind power generation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(1): 29-33.
- [10] YIN Ming, LI Geng-yin, et al. Modeling of VSC-HVDC and its active power control scheme[C] // IEEE International Conference on Power System Technology, 2006.
- [11] XU L, YAO L, BAZARGAN M. Fault ride through of large offshore wind farms using HVDC transmission[C] // Proceedings of Power Tech Conference, Romania, 2009.
- [12] 杨思祥, 李国杰, 阮思焯, 等. 应用于 DFIG 风电场的 VSC-HVDC 控制策略[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 64-67.
YANG Si-xiang, LI Guo-jie, RUAN Si-ye, et al. Control strategies for VSC-HVDC applied to DFIG based wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 64-67.
- [13] LI Jun, LI Du-jiang, HONG Lei, et al. A novel power-flow balance LVRT control strategy for low-speed direct-drive PMSG wind generation system[J]. IEEE Industrial Electronics Society, 2010: 748-753.
- [14] 任敬国, 赵建国, 于大洋, 等. VSC-HVDC 输电系统模式切换控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 69-73.
REN Jing-guo, ZHAO Jian-guo, YU Da-yang, et al. Mode switching control strategy for VSC-HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 69-73.
- [15] 关宏亮, 赵海翔, 王伟胜, 等. 风电机组低电压穿越功能及其应用[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 173-177.
GUAN Hong-liang, ZHAO Hai-xiang, WANG Wei-sheng, et al. LVRT capability of wind turbine generator and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(10): 173-177.
- [16] 马文龙. Crowbar 保护在双馈异步风力发电系统电网故障穿越中的应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 127-130.
MA Wen-long. Application of Crowbar circuit in grid fault riding through for doubly-fed induction wind power generation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 127-130.

收稿日期: 2014-01-04; 修回日期: 2014-03-03

作者简介:

章心因 (1978-), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事风力发电、电力电子技术及应用方面的研究; E-mail: zhang_xinyin@126.com

胡敏强 (1961-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事工程电磁场计算、电机及其控制技术、电气主设备状态监测与故障诊断方面的研究;

吴在军 (1975-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事分布式发电与微网、数字化变电站、电能质量分析与控制方面的研究。