

基于 VSC-HVDC 的风力发电系统低电压穿越协调控制

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 电力工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要: 提出一种适用于通过 VSC-HVDC 系统并网风电场的低电压穿越协调控制策略。建立高压直流输电线路和风电场的模型, 分析电网故障期间系统的工作原理。低电压穿越期间, 通过 HVDC 两端变流站提供无功支持, 并采用基于电压控制的快速功率降低算法控制风电场馈入功率, 维持直流系统功率平衡; 对风电机组功率控制进行改进, 提出分层控制与 HVDC 控制相协调, 保持风电机组的电压稳定。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; 电压控制; 高压直流输电

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.03.023

0 引言

通过 VSC-HVDC 输电系统并网的风电场能否满足低电压穿越(LVRT)要求是一个新的课题。在电网故障时风电场需提供无功支持, 而基于 VSC-HVDC 的风电系统, 无功支持是由 HVDC 电网侧受端站(REC)完成的。但若故障发生时风电场接近额定功率运行, 而注入电网的功率受限, 将使 HVDC 两端功率不平衡, 引起直流线路电压骤升^[1], 严重时将导致线路跳闸, 无法实现 LVRT 要求^[2]。因此, 此类风电系统的 LVRT 问题与交流并网风电系统有明显的区别, 需要同时满足 HVDC 系统和风电场的功率平衡及电压稳定要求, 相对更为复杂。

当前提出的方法主要有以下 3 类。

a. 增大 HVDC 变流器容量。文献[3]通过提高 REC 变流器与直流电容额定容量及多个并联安装, 使故障期间可通过更大电流。但考虑到成本, 增加器件容量是有限的。在长时间和严重故障下, 功率不匹配会很严重, 仍有可能超出器件容量, 因此这种方法较适用于短时的电压跌落故障。

b. 在 HVDC 线路上附加耗能/储能电路,消耗故障期间风电场馈入的多余功率, 保持直流电压可控^[4-5]。风电场可完全不受故障影响, 但需采用全功率斩波电路或储能元件, 成本高, 控制复杂, 且易受耗能电阻热容量的限制, 并不是最经济的解决方案。

c. 改变控制策略,减少风电场输出功率。文献

[6] 提出基于直接通信的快速功率降低方法。当 REC 检测到故障时, 将信号传到风电场, 风电场根据故障情况重新设置发电功率参考值, 控制风机变流器减小功率输出。缺点是需在 HVDC 与风电场之间装设通信线路, 且通信延迟限制了功率降低的速度, 通信可靠性也可能成为问题。

因此对基于 VSC-HVDC 风电系统的 LVRT 问题, 目前还缺乏经济可靠的实现方法和统一的控制算法。鉴于上述情况, 本文在对电网提供无功支持的基础上, 通过快速降低故障期间风电场注入功率, 有效地消除了电压跌落对 VSC-HVDC 系统的影响; 并对比分析风机功率控制算法, 提出风电机组分层控制策略, 减小风机发电功率。通过 HVDC 变流站和风电机组的协调配合, 可靠地实现了 LVRT。最后对所提出的控制策略进行了详细的仿真验证。

1 电压跌落时系统的运行特性

基于 VSC-HVDC 并网的风电系统模型如图 1 所示。风机为直驱式 PMSG 机组, 采用背靠背双 PWM 变流器结构^[7], VSC-HVDC 系统采用端到端结构^[8]。稳态运行时, 风电场侧送端站(SEC)控制风电场出口电压及频率, 为风电场提供一个给定幅值和频率的电压参考点^[9]; 电网侧 REC 维持直流电压稳定, 将

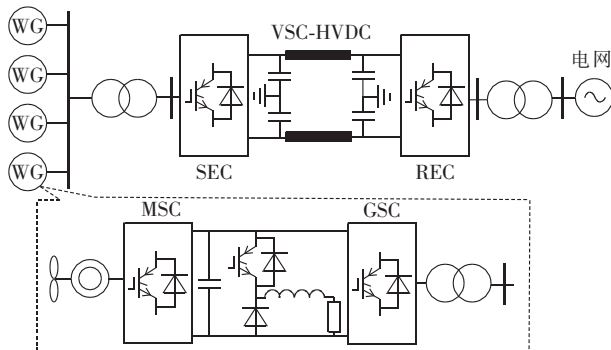


图 1 基于 VSC-HVDC 的并网风电场系统模型
Fig.1 Model of wind power system based on VSC-HVDC

收稿日期: 2013-03-11; 修回日期: 2013-12-04

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2011AA-05A107); 国家自然科学基金资助项目(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资助项目(12KJB470006)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA05-A107), the National Natural Science Foundation of China(51177-015, 51077068), the Department of Science and Technology of Jiangsu Province(BY2010142) and the Natural Science Foundation of Jiangsu Education Department(12KJB470006)

SEC 传送的功率注入电网,此时有功电流具有较高的优先级^[10]。

当电网发生电压跌落时,根据无功电流与电压支撑的特性,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^[11]:

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

其中, i_{Rq} 为 REC 无功电流; u_g^* 、 u_g 为故障前、后电网侧 REC 交流电压。

此时,有功电流上限为:

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

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

则最大可传输功率 $P_{g, \max}$ 为:

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

可见,变流器的电流上限与无功电流优先将导致有功电流减小,且由于电网电压的降低,REC 只能将发电功率的一小部分送入电网。

而在此期间,SEC 因不能测得故障仍按故障前功率注入直流线路,若此时风电场运行接近额定功率,REC 和 SEC 间将产生严重的功率不平衡并导致直流母线过电压。这也是基于 VSC-HVDC 的风电系统在 LVRT 期间需要解决的主要问题^[12]。

2 LVRT 协调控制

LVRT 协调控制是指电网电压跌落期间 HVDC 变流站和风电机组控制策略的相互配合,包括 HVDC 控制和风电机组控制两部分,结构如图 2 所示。SEC 通过电压/频率调节减少风电场馈入的功率,同时风电机组采用相应的控制快速减少发电功率,维持直流线路电压稳定,实现系统 LVRT 功能。

2.1 VSC-HVDC 控制策略

检测到电网电压跌落时,REC 切换到无功优先,根据式(1)向电网发出无功电流。有功、无功基于电网电压矢量定向解耦,并采用动态响应良好的前馈电流控制^[13],如图 3 所示。

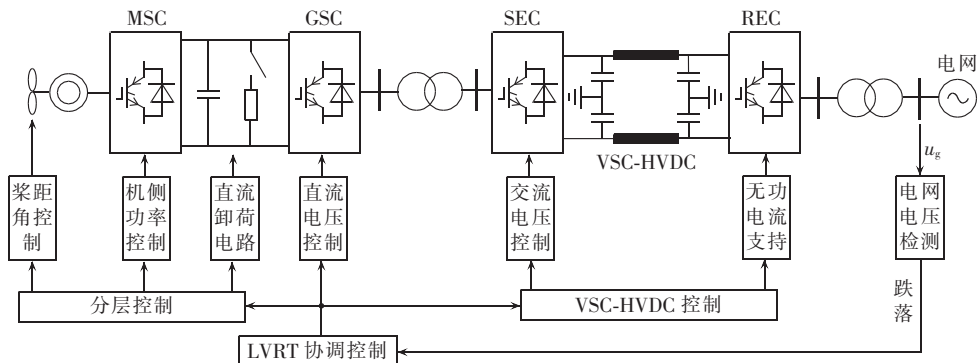


图 2 LVRT 协调控制结构图
Fig.2 Structure of coordinated LVRT control

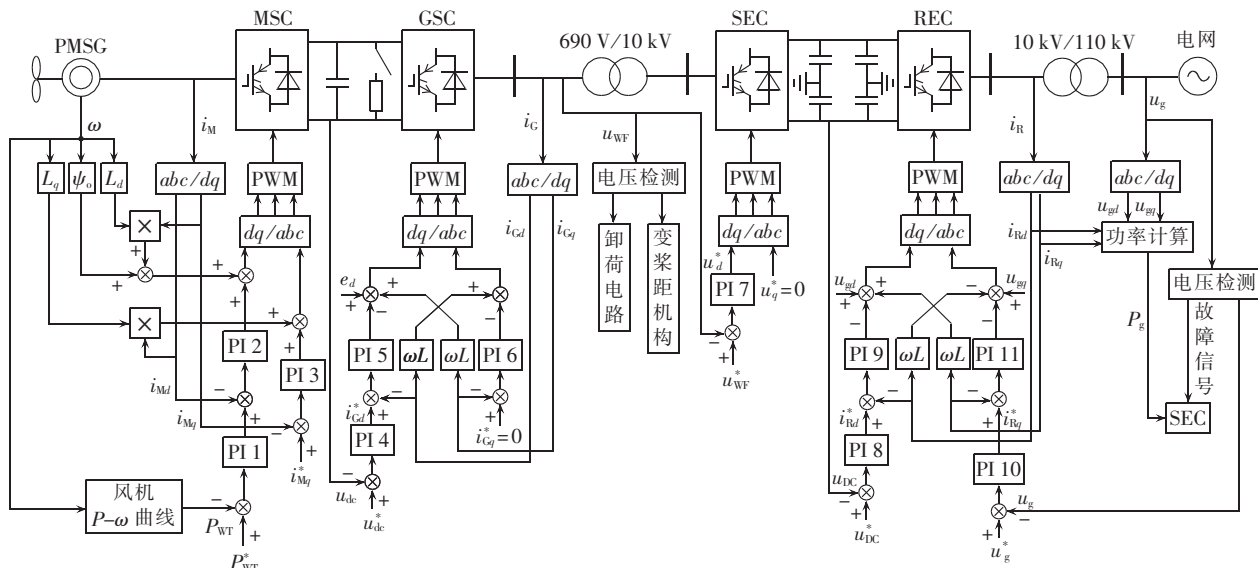


图 3 LVRT 协调控制原理图
Fig.3 Schematic diagram of coordinated LVRT control

同时,SEC 根据 REC 发送的故障信号重新计算交流电压参考值,控制风电场出口电压下降以快速降低风电场馈入 HVDC 线路的功率,维持直流线路功率平衡:

$$u_{WF}^* = \begin{cases} \frac{P_{g,max}}{i_{Cd}} & P_{g,max} \leq P_{WF} \\ u_{WF0}^* & P_{g,max} > P_{WF} \end{cases} \quad (4)$$

其中, i_{Cd} 为机组网侧变流器(GSC)有功电流标幺值; P_{WF} 为风电场输出功率; u_{WF0}^* 、 u_{WF}^* 分别为故障前、后风电场交流电压参考值。

要注意的是,为避免与 SEC 控制相矛盾,在此期间应停用风机 GSC 的无功支持功能。但该方法也有以下 2 个问题需要注意。

a. 由于 HVDC 和风电场之间无需通信,且未直接设定功率降低值,电压下降将造成 GSC 电流上升,这必须通过 SEC 进一步降低风电场电压来减小输出功率,因此 GSC 有功电流极限必须被设定接近额定电流而功率输出则随电压降低相应改变。

b. 出口电压突然降低会使风电场出现类似故障的现象,导致 PMSG 直流侧过电压,必须对风电机组 LVRT 期间的控制进行统一协调。

2.2 风电机组分层控制

对上述控制策略导致的风电场输出功率受限,风电机组采用功率控制快速减少风机发电功率,确保直流电压稳定。表 1 为功率控制的几种方法^[14],机侧功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,可与直流卸荷电路、桨距角控制配合使用,在不同故障程度下相互补充,形成分层控制,以提升控制的快速性和经济性。由机侧功率控制构成第 1 层控制,直流卸荷电路与桨距角控制相结合构成第 2 层控制。

表 1 降低风电场输出功率的方法
Tab.1 Reduction of wind farm output power

控制策略	作用	缺点
机侧功率控制	降低发电功率	转速上限、响应时间
直流卸荷电路	防止直流过压	卸荷电阻散热、成本
桨距角控制	减少风能捕获	响应时间

PMSG 的机侧功率控制如图 3 所示。GSC 维持直流电压稳定,无功控制在此处并不使用以避免与 SEC 的电压控制策略相冲突,其全部容量用于有功输出。当 SEC 控制风电场出口电压 u_{WF} 下降时,风电场输出功率将受限为 $P_{WF} = u_{WF} i_{Cd}$,此时 i_{Cd} 大小为 GSC 额定电流值;机侧变流器(MSC)则根据输出功率实时调整发电机转速,减小发电功率,采用功率外环、电流内环的级联控制结构^[15]。

在本文的风电系统中,由于对电网的无功支持是

由 REC 提供,GSC 的全部容量用于有功输出,从而可降低机组卸荷电路的参数要求,只需加装部分功率的卸荷电路。

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;桨距角控制能从根本上减少风能吸收,控制原理见图 4,图中 p_e 、 p_e^* 分别为风机发电功率及其参考值; ω 、 ω_N 分别为风机转速及其参考值; β 为桨距角。但响应较慢,每秒变化最大值为 $10^\circ \sim 20^\circ$,只能作为其他方法的辅助。

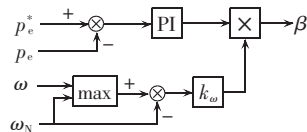


图 4 桨距角控制图
Fig.4 Diagram of pitch angle control

分层控制具体工作原理为:当风电场出口电压下降使 GSC 电流达到额定值时,启动第 1 层控制,通过 MSC 降低发电功率,使 PMSG 转子加速,脱离最大风能跟踪曲线,将部分风能转化为动能储存在风轮中;当电压跌落较为严重,发电机转速接近上限仍不能满足要求时,启动第 2 层控制,进行紧急变桨控制,屏蔽部分风能,其间当直流母线电压超过 1.1 p.u. 时,开关导通,投入卸荷电阻,以避免由于桨距角变化较慢而出现的直流侧过压,当直流母线电压低于 1.1 p.u. 时切除。

本文中 REC 电流上限设为 1.2 p.u.,发电机转速上限设为 1.4 p.u.。由式(1)—(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 1.2 p.u.,启动分层控制算法;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.,当转速达到 1.3 p.u. 时,其功率输出降为 0.8 p.u.。同时由于风机 GSC 只发出有功电流,可求出分层控制中风电场出口电压 u_{WF} 的划分范围,如表 2 所示。

表 2 LVRT 分层控制策略
Tab.2 Hierarchical LVRT control

电压范围	LVRT 分层控制策略
$u_g \geq 0.86 \text{ p.u.}, u_{WF} = 1 \text{ p.u.}$	GSC 电流未达到上限
$0.74 \text{ p.u.} < u_g < 0.86 \text{ p.u.}, 0.8 \text{ p.u.} < u_{WF} < 1 \text{ p.u.}$	启动 MSC 功率控制
$u_g \leq 0.74 \text{ p.u.}, u_{WF} \leq 0.8 \text{ p.u.}$	辅以卸荷电路+变桨控制

3 仿真分析

应用 MATLAB/Simulink 搭建系统模型进行仿真分析,参数为:HVDC 电网侧电压 110 kV,风电场侧电压 10 kV,REC 容量 10 MV·A,直流电容 250 mF, $u_{DC}^* = 20 \text{ kV}$,线路长 10 km,通信延时 10 ms;风电场容量 10 MW,由 1 台 PMSG 等效;变流器容量 10 MV·A,直流电容 20 mF, $u_{dc}^* = 1600 \text{ V}$,出口线电压 690 V,电抗器 $L_g = 1.3 \text{ mH}$,变压器 690 V/10 kV、容量 50 MW。考

虑最严重情况,故障前风力发电机以额定风速、单位功率因数运行,输出功率最大。

图 5 为电网电压跌落情况,图中 u_g 为标么值。0.15 s 之前,系统运行于正常状态,有功输出为 1 p.u.,功率因数为 1;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。

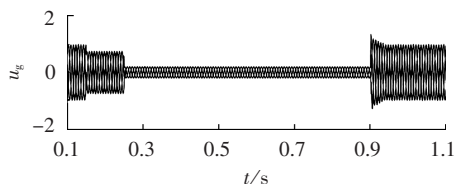
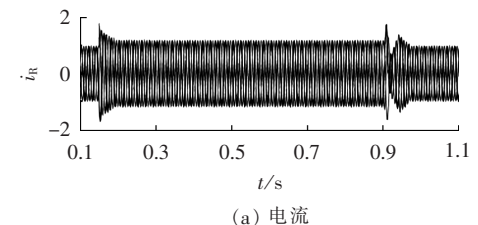
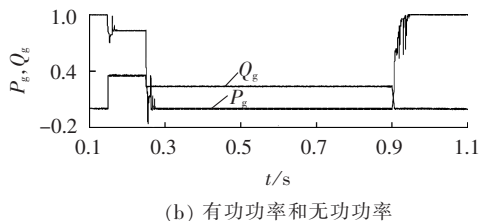


图 5 电网电压跌落
Fig.5 Grid voltage drop

图 6 描述了电网电压跌落时 REC 对电网无功支持及输出功率受限的情况,图中纵轴均为标么值。当电压跌落至 0.75 p.u. 时,REC 发出无功 0.375 p.u.,电流达到上限,有功输出受限为 0.818 p.u.;当电压跌至 0.2 p.u. 时,REC 发出无功 0.24 p.u.,有功输出几乎为 0。可见电压下降与无功优先是 REC 有功受限的主要原因。



(a) 电流

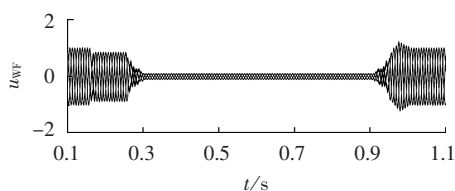


(b) 有功功率和无功功率

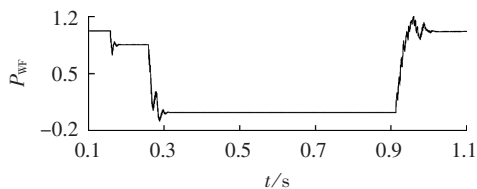
图 6 REC 电流 i_g 、有功功率 P_g 和无功功率 Q_g
Fig.6 Current i_g , active power P_g and reactive power Q_g of REC

图 7 描述了协调控制时风电场出口电压、功率和 HVDC 直流母线电压的变化过程,图中纵轴均为标么值。SEC 根据式(4)控制风电场出口电压下降,快速地降低了风电场输出功率,较好地稳定了 HVDC 直流母线电压,说明协调控制策略是可行的。

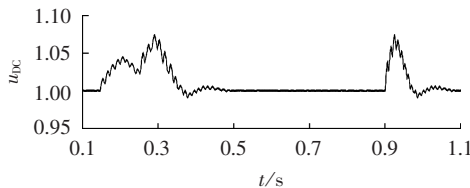
图 8 是风电机组分层控制的情况,图中 ω 、 P_{WT} 、 u_{dc} 为标么值。当电网电压跌落至 0.75 p.u. 时,SEC 控制风电场出口电压降低至 0.82 p.u.,风电机组启动第 1 层控制,MSC 控制发电机加速降低发电功率。由于转速变化有一定延迟,机组直流侧电压有短暂上升;当电网电压跌至 0.2 p.u. 时,SEC 进一步调低



(a) 风电场出口电压



(b) GSC 输出功率



(c) HVDC 直流母线电压

图 7 SEC 协调控制策略时的结果

Fig.7 Result of coordinated control strategy of SEC

风电场电压,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,启动第 2 层控制,变桨距机构动作,由于变桨控制响应时间长,发电功率下降较慢,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。可以看出,理论计算与仿真结果基本一致,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。

从电网电压不同程度跌落时的仿真可得出以下结论。

a. 与交流并网风电场不同,此处是通过 REC 向电网注入无功电流支撑电网电压,且动态无功补偿均能在电压跌落后的 30 ms 内响应。

b. 协调控制策略通过风电场出口交流电压控制,可快速、有效抑制 HVDC 系统功率不平衡,稳定直流母线电压,且能在电压跌至 20%、持续时间 625 ms 的最严重情况下实现系统的不脱网运行。

c. 机侧功率控制使发电机加速,减少电能输出,但有一定延迟,只适用于转速变化范围较大的多极低速 PMSG,且只能短暂运行在 1.4 倍的额定转速左右。

d. 桨距角控制可以有效减少风能捕获,但响应时间较长,直流卸荷电路控制简单,反应迅速,将这 2 种方法结合使用不仅可避免风电机组直流母线过电压,而且降低了对卸荷电阻热容量的限制。

e. 电网故障解除后,有功功率能快速恢复,满足 LVRT 对有功功率恢复时间的要求。

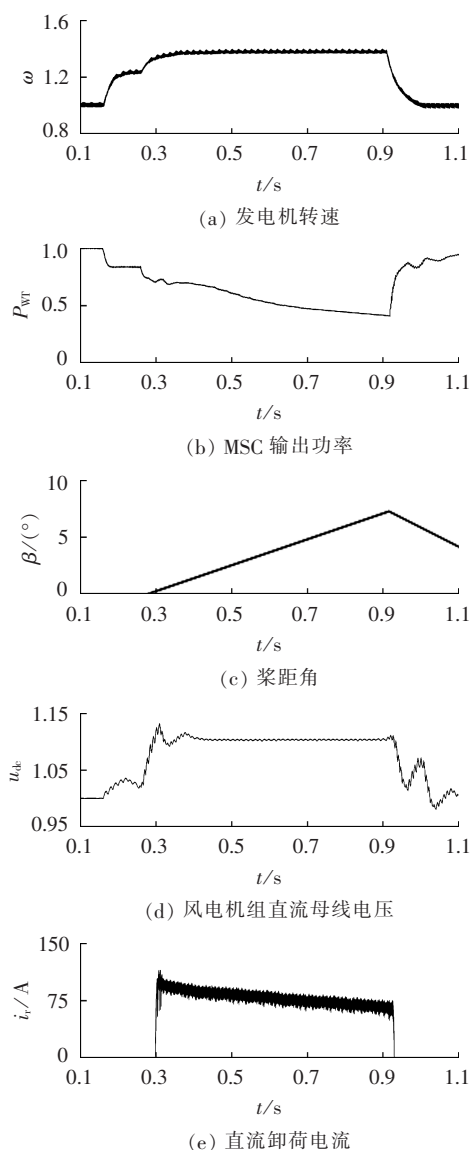


图8 风电机组分层控制策略时的结果

Fig.8 Result of hierarchical control strategy of wind turbine

4 结论

本文针对基于VSC-HVDC并网风电系统的LVRT问题,设计了一种新的协调控制策略。通过调整HVDC系统与风电机组的控制算法,并设计风电机组分层控制,实现了基于VSC-HVDC并网风电场的LVRT。

a. 协调控制策略不仅充分利用HVDC的变流器容量向电网提供无功支持,并且能根据电网电压跌落深度,改变控制方式,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,具有较好的快速性和有效性。

b. 协调控制策略合理利用风电机组装配的直流卸荷电路,并大幅降低了对电阻参数的要求,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;同时,VSC-HVDC系统与风电场间无需通

信连接,具有较高的可靠性。

c. 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,而不需要增加其他设备,并在同一系统内把风力发电直流并网、无功补偿、LVRT功能结合在一起,有较高的性价比和利用率;并且适用于VSC-HVDC各种拓扑结构,具有较好的移植性。

参考文献:

- [1] 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 Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1537-1546.
- [2] 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 Wenlong. 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.
- [3] XU L, YAO L, SASSE C. Grid integration of large DFIG-based wind farms using VSC transmission[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 976-984.
- [4] 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 Yikang, 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.
- [5] LI Jun, LI Dujiang, HONG Lei, et al. A novel power-flow balance LVRT control strategy for low-speed direct-drive PMSG wind generation system[C]//IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Glendale, AZ, USA: [s.n.], 2010: 748-753.
- [6] FELTES C, WREDE H, KOCH F, et al. Fault ride-through of DFIG-based wind farms connected to the grid through VSC-based HVDC link[C]//Proceedings of the 16th Power Systems Computation Conference. Glasgow, UK: PSCC, 2008: 1-7.
- [7] XIANG Daiwei, RAN Li, TAVNER P J, et al. Control of a doubly fed induction generator in a wind turbine during grid fault ride-through [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 652-662.
- [8] 徐政, 陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 1-10.
XU Zheng, CHEN Hairong. Review and applications of VSC HVDC [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 1-10.
- [9] 张永斌, 袁海文. 双馈风电机组低电压穿越主控系统控制策略[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(8): 106-112.
ZHANG Yongbin, YUAN Haiwen. Control strategy of DFIG main control system during low voltage ride through [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(8): 106-112.
- [10] VRIONIS T D, KOUTIVA X I, VOVOV N A, et al. Control of an HVDC link connecting a wind farm to the grid for fault ride-through enhancement [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 2039-2047.
- [11] 王成福, 梁军, 冯江霞, 等. 故障时刻风电系统无功电压协调控制策略[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(9): 14-17.
WANG Chengfu, LIANG Jun, FENG Hongxia, et al. Coordinated var-voltage control during fault of wind power system [J]. Electric

- Power Automation Equipment,2011,31(9):14-17.
- [12] 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 Jingguo,ZHAO Jianguo,YU Dayang,et al. Mode switching control strategy for VSC-HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(6):69-73.
- [13] 杨思祥,李国杰,阮思烨,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 Sixiang,LI Guojie,RUAN Siye,et al. Control strategies for VSC-HVDC applied to DFIG based wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(19):64-67.
- [14] 凌禹,高强,蔡旭. 紧急变桨与撬棒协调控制改善双馈风电机组低电压穿越能力[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):18-23.
- LING Yu,GAO Qiang,CAI Xu. Improvement of low-voltage ride-through by coordinated pitch control and Crowbar control for DFIG wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(4):18-23.
- [15] 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 Jianlin,XU Shaohua. Control strategy of low-voltage ride-through for direct-drive wind power generation system [J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(1):29-33.

作者简介:



章心因

章心因(1978-),男,江苏溧阳人,讲师,博士研究生,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,江苏丹阳人,教授,博士研究生导师,博士,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,江苏南京人,教授,博士,主要研究方向为分布式发电与微网、数字化变电站、电能质量分析与控制;

郝忠鹏(1971-),男,江苏扬州人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统运行与控制、电力系统低频振荡、风力发电技术。

Coordinated LVRT control of wind power generation system based on VSC-HVDC

ZHANG Xinyin^{1,2},HU Minqiang¹,WU Zaijun¹,HAO Sipeng²

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

2. School of Electric Power Engineering,Nanjing Institute of Technology,Nanjing 211167,China)

Abstract: A coordinated control strategy is proposed for the LVRT(Low Voltage Ride Through) of wind farm with grid-connecting VSC-HVDC. The models for HVDC line and wind farm are built and the working principle of system during grid fault is analyzed. The converters at both sides of HVDC provide reactive power during LVRT and the fast power reduction based on voltage control is adopted to control the in-feed power of wind farm for the power balance of DC system. The hierarchical control is coordinated with the HVDC control to improve the power control of wind turbine for its voltage stability. The simulative results of case study verify the quickness and effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: wind farms; VSC-HVDC; LVRT; coordinated control; hierarchical control; voltage control; HVDC power transmission

(上接第 137 页 continued from page 137)

Multi-peak MPP distribution of photovoltaic array

QI Jun,WENG Guoqing,ZHANG Jinghong

(College of Information Engineering,Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023,China)

Abstract: With the help of computer simulation and statistical analysis,the characteristics of photovoltaic array output under partial shade are studied based on its general mathematical model. Results of statistical analysis reveal that,the voltage interval between adjacent MPPs(Maximum Power Points) in multi-peak $P-U$ curve is bigger and most of the global MPPs lie at the right side of voltage axis in most cases;it has bigger probability that the power of local MPPs at both sides of global MPP decreases monotonously;the intersection of load line and $I-U$ curve is closely associated with the global MPP. Experiences are summarized based on the results of statistical analysis for the design of multi-peak MPPT algorithm.

Key words: photovoltaic array; photovoltaic cells; partial shade; multi-peak characteristics; maximum power point; maximum power point tracking; statistical methods; computer simulation