

基于MSVC和Crowbar的DFIG低电压穿越控制策略

撬棒电路是提高风电机组低电压穿越能力的有效方法之一，为了改进撬棒电路的性能，加装无功补偿装置与其相互配合。针对现存无功补偿装置的不足，提出了一种采用基于磁控电抗器（Magnetically Controlled Reactor, MCR）的动态无功补偿装置（MSVC）和撬棒（Crowbar）保护电路实现双馈风电机组低电压穿越的控制策略。在Matlab/Simulink中构建了基于控制策略的双馈风电机组模型，仿真验证了不同电压跌落下的双馈风电机组低电压穿越能力，不仅有效保护了机组转子变流器，提高了风电机组低电压穿越能力，而且增强了故障穿越后机组和系统运行的稳定性。

袁 昕¹ 蒋俊凤² 罗 君³ 王洪涛¹ / 1. 国网新疆电力公司经济技术研究院
2. 河南平芝高压开关有限公司 3. 国网新疆电力公司富蕴县供电公司

0 引言

为保证电网能够安全稳定运行，《风电并网技术规程》规定风电机组必须具有低电压穿越能力（Low Voltage Ride Through, LVRT）^[1]。双馈风电机组（Doubly-Fed Induction Generator, DFIG）因其优越性成为风电场的主流机型，其LVRT也成为研究热点。

针对DFIG在电压跌落时失去稳定性的问题，国内外学者提出了多种改进方案提高其LVRT能力。文献[2]建立了计及电网电压变化的DFIG数学模型，改进变流器的控制策略实现LVRT，但该方案只适用于电压跌落程度较浅的情况。当电网电压跌落程度较深时，难以实现LVRT，需增加硬件拓扑。文献[3]分析了Crowbar阻值和退出时间对DFIG实现

LVRT的影响，投入Crowbar后，DFIG从系统中吸收大量的无功功率，恶化电网的稳定运行。文献[4]提出了Crowbar电路与机侧变频器消磁控制策略相结合的方法实现LVRT，但需增加无功补偿装置。文献[5]提出了采用STATCOM与Crowbar实现LVRT的控制策略，但STATCOM设备投资大，后期维护费用高，保证电网的瞬态稳定性能力不足。文献[6-9]研究了DFIG的不同LVRT方法和控制策略，通过对比发现，风机在电压跌落结束后稳定性相对较差。

本文提出了一种基于MCR的动态无功补偿装置（MSVC）和撬棒（Crowbar）保护电路实现双馈风电机组LVRT能力的思路。在Matlab/Simulink中搭建基于DFIG的风电场模型，仿真验证了该思路下风电场的低电压穿越特性。研究结果表明，所提出的LVRT控制策略不仅实现了机组低电压穿越能力，而且也能增强故障穿越后机组和系统运行的稳定性。

1 基于Crowbar电路的LVRT技术

图1为DFIG实现LVRT所采用的主动式IGBT型Crowbar保护电路。电网出现故障时，投入Crowbar电路将变流器旁

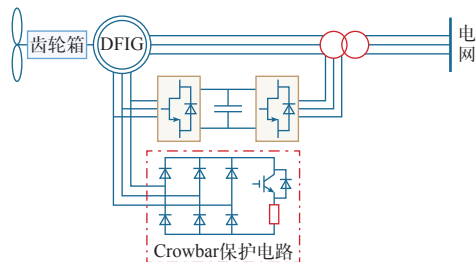


图1 主动式IGBT型Crowbar电路



袁 昕/工程师

关键词/Keywords

双馈风电机组 ·
磁控电抗器 ·
低电压穿越 ·
运行特性 ·

国家自然科学基金项目（51267019）。

路;故障后Crowbar退出运行,风电系统恢复正常运行,从而实现低电压穿越。

图2为 $t=2$ s时风电场联络线发生三相短路故障,基于Crowbar技术的DFIG的转子电流包络线波形。仿真过程中故障持续625 ms。

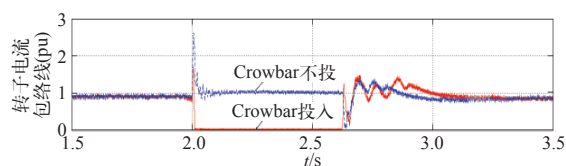


图2 对比波形

通过对比波形可知,投入Crowbar电路后,转子侧的电流大幅下降,保证转子侧过电流在允许的范围之内,确保了风电机组在故障时不脱网。

故障时投入Crowbar电路后,机组的无功功率波动较大,如图3所示。这是由于投入Crowbar电路后,DFIG变为普通异步发电机,需从电网吸收无功功率,不利于系统电压恢复。

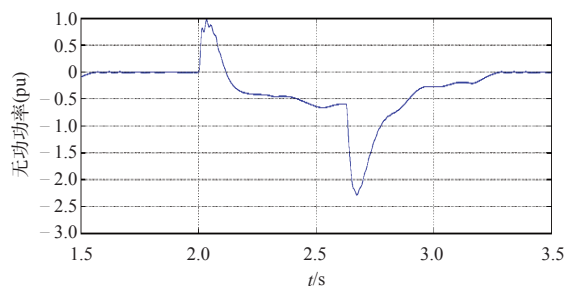


图3 机组无功功率

为此,本文提出在风电场加装MSVC无功补偿装置,与Crowbar保护相互配合,在系统电压降低时及时输出无功功率,抬高机端电压,补偿机组异步运行的无功需求,提高风电场的LVRT能力。

2 具备LVRT的DFIG结构

2.1 磁控型动态无功补偿装置(MSVC)

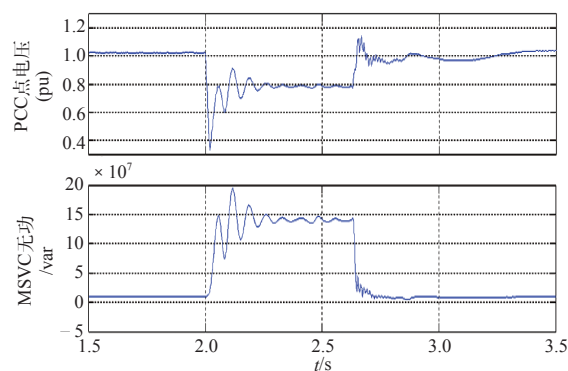
MSVC由磁控电抗器(MCR)、固定电容器(FC)及无功补偿控制单元三部分组成。FC提供固定的容性无功功率,MCR提供可调的感性无功功率。MCR通过改变晶闸管控制角,平滑调节电抗器容量,进而调节MCR输出的感性无功功率。

故障期间FC提供一定的无功功率提高机端电

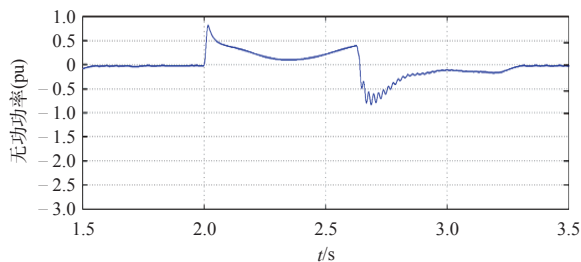
压。故障消除后,机端电压在一段时间会继续升高,超过了正常电压,此时调节MCR提供一定的感性无功功率来降低机端电压。正是由于MCR的可调性,将MCR+FC型SVC变成了可调的补偿装置,实时进行无功功率的发出和吸收,从而保证机端电压的快速恢复。

在Matlab/Simulink中搭建MCR和FC模型,MCR的额定功率为100 MW,FC的容性无功为200 Mvar。

图4为风电场加装MSVC的补偿效果图。从图5中可以看出,MSVC能够实时跟踪机端电压进行补偿,补偿效果很明显。且加装MSVC无功补偿装置后,机组的无功功率波动较小。



(a) 无功补偿波形



(b) 机组无功功率

图4 加装MSVC补偿效果图

与传统的TCR型SVC相比,MSVC电气结构简单,占地面积小,基础投资小;MSVC自身有功损耗低至0.8%;MSVC装置造价远小于TCR型SVC;MSVC只承受1%左右的总电压,晶闸管不容易被击穿,运行稳定可靠;工作效率较高;储能元件容量大;能适应风沙环境,对环境要求不高。

2.2 基于MSVC与Crowbar的无功补偿系统

为了提升机组LVRT能力和穿越结束后的稳定运行能力,提出基于磁控电抗器(Magnetically

Controlled Reactor, MCR) 的静止型动态无功补偿装置 (MSVC) 和Crowbar保护电路的控制策略实现DFIG低电压穿越。

3 DFIG实现LVRT的控制策略

相关文献的研究结果指出, 在电压跌落程度较深时投入Crowbar电路作用明显; 在电压跌落程度较浅时投入Crowbar不利于电压跌落结束后机组的稳定运行, 还将造成不必要的功率损耗^[10]。为兼顾机组低电压穿越能力和电压跌落结束后机组稳定运行能力, 提出了基于MSVC和Crowbar的LVRT控制策略, 图5为提出的LVRT协调控制策略流程图。图5中, X 为机端电压跌落程度分界点, 取值在0.2 ~ 0.9 pu之间; U_{dc} 、 i_{stator} 分别为直流侧电压和转子电流的实际值, U_{dcmax} 、 $i_{statormax}$ 分别为直流侧电压和转子电流的动作值。

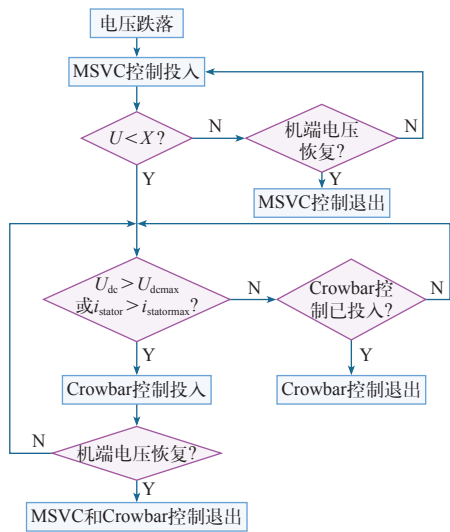


图5 控制策略流程图

当电压发生跌落时, MSVC控制投入, 对电网进行无功补偿, 同时判断机端电压跌落程度, 当 $U > X$ 时, Crowbar不投入运行, 依靠MSVC实现风电机组低电压穿越, 若机端电压恢复, MSVC控制退出。当 $U < X$ 时, 判断Crowbar的动作条件是否满足, 当直流侧电压 $U_{dc} > U_{dcmax}$ 或转子电流 $i_{stator} > i_{statormax}$ 时, Crowbar投入运行, 此时Crowbar与MSVC相互配合实现风电机组低电压穿越, 机端电压恢复后, MSVC和Crowbar控制退出。

4 基于控制策略的LVRT特性

4.1 风电系统的LVRT仿真算例

为验证所提出的LVRT控制策略的可行性, 在Matlab/Simulink中搭建图6所示的基于DFIG的风电场并网模型, DFIG部分参数如表1所示; 通过采集算例机组在不同电压跌落水平下的运行数据, 得到算例中电压跌落分界点 X 取值0.6 pu。

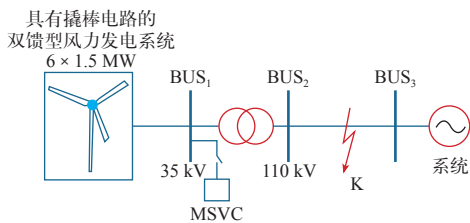


图6 风电系统并网模型结构框图

表1 双馈风电机组参数

参数	数值	参数	数值
额定容量/MW	1.5	转子电阻(pu)	0.006 613
额定频率/Hz	50	定子电抗(pu)	0.976
额定风速/(m/s)	12	转子电抗(pu)	0.163 4
定子电阻(pu)	0.005 876	互感电抗(pu)	5.136

4.2 只投入MSVC的DFIG的LVRT特性

当机端电压小幅跌落 (0.6 ~ 0.9 pu) 时, 只投入MSVC进行无功补偿; 图7为电压跌落至0.8 pu

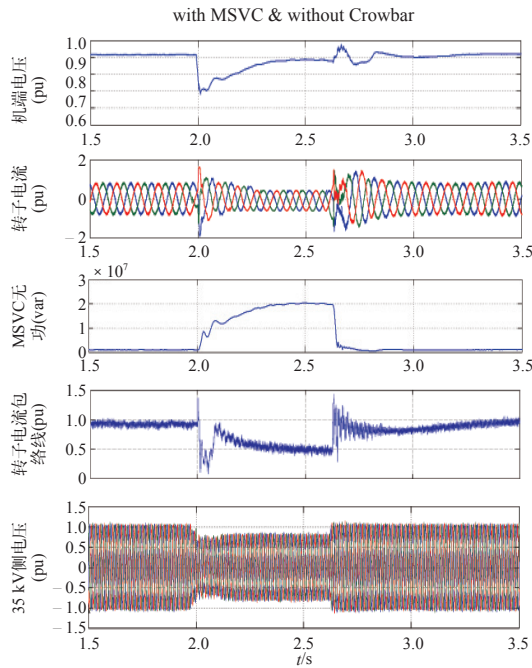


图7 电压跌落至0.8 pu投入MSVC时的仿真波形

时, 机组只投入MSVC的LVRT特性仿真波形。

由图7可知, 电压跌落至0.8 pu时, 投入MSVC电路, 机端电压逐渐上升, 转子侧电流为1.5 pu左右, 转子电流包络线为1.5 pu左右。故障消除后, 转子侧电流维持在1.5 pu以内, 由机端电压波形可看出投入MSVC电路补偿效果明显。因此电压小幅跌落时只需投入MSVC就可实现LVRT, 达到规程要求, 且减少了投入Crowbar电路所带来的损耗。

图8为电压跌落至0.2 pu时, 机组只投入MSVC的LVRT特性仿真波形。

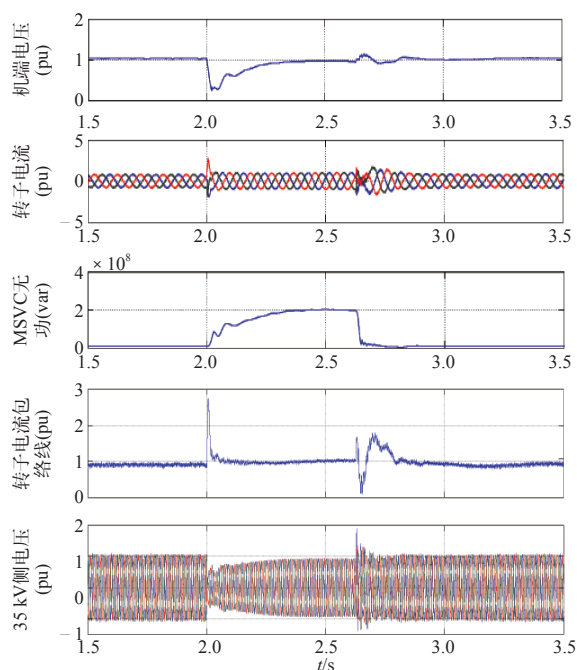


图8 电压跌落至0.2 pu投入MSVC时的仿真波形

仿真结果表明, 在电压跌落较深时, 只投入MSVC进行无功补偿, 转子侧电流为2 pu左右, 转子电流包络线为2.5 pu, 严重影响DFIG的安全稳定运行(见图8)。因此, 在电压跌落较深时, 需要增加硬件拓扑, 结合MSVC无功补偿共同实现风电机组低电压穿越。

4.3 投入MSVC和Crowbar的DFIG的LVRT特性

当机端电压大幅跌落(0.2~0.6 pu)时, 同时投入MSVC和Crowbar。图9为电压跌落至0.2 pu时, 机组投入MSVC和Crowbar的LVRT特性仿真波形。

由图9可知, 电压跌落至0.2 pu, 投入MSVC和Crowbar电路, 转子侧电流为零, 机端电压逐

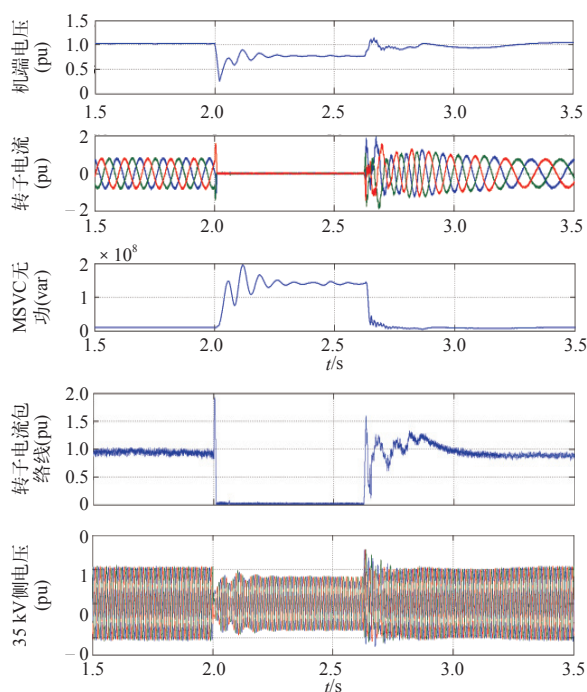


图9 投入MSVC和Crowbar电路时的仿真波形

渐上升。由机端电压波形可看出, 投入MSVC和Crowbar电路补偿效果明显, 风电机组能够保持并网运行625 ms; 在电压跌落0.2 s内能够恢复至0.9 pu, 且保持连续运行, 实现了LVRT, 达到规程要求。

4.4 不同控制策略的对比分析

为满足DFIG实现LVRT, 在DFIG中加入撬棒电路, 保证发生故障时不因转子侧过电流而造成风机脱网。投入撬棒电路之后, 会造成机端电压的再次跌落, 为了更好地稳定机端电压, 选用了MCR型动态无功补偿设备进行无功补偿, 效果显著。图10为不同控制策略的对比分析图。

通过对比分析可知, 电压小幅跌落时, 投入MSVC后, 机端电压逐渐上升, 转子电流明显下降, 在没有投入Crowbar的情况下同样实现了LVRT, 达到规程要求。因此在电压小幅跌落时, 不必投入Crowbar, 减少了损耗。当电压大幅跌落时, 仅投入MSVC后, 转子电流包络线为2.5 pu, 严重影响DFIG的安全稳定运行, 因此在电压跌落较深时, 必须投入Crowbar, 使转子电流大幅下降, 保证机组的安全运行。与仅投入Crowbar相比, 加装MSVC后, 不仅提升了机端电压, 提高了

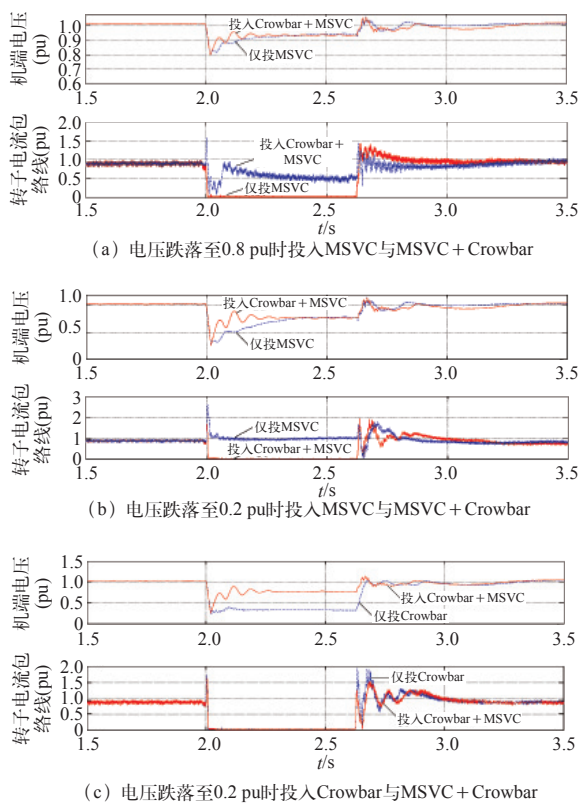


图10 不同控制策略下的对比波形

机端电压的提升速度,而且克服了Crowbar保护电路投入时造成的机端电压再次跌落的问题。

5 结束语

所提出的应用于DFIG的低电压穿越控制策略,在电压小幅跌落(0.6~0.9 pu)时,Crowbar不投入运行,利用MSVC无功补偿实现风电机组低电压穿越;在电压大幅跌落(0.2~0.6 pu)时,Crowbar投入运行,并结合MSVC无功补偿共同实现风电机组的低电压穿越。仿真结果证明了该控制策略不仅能够实现DFIG的低电压穿越,而且增强了DFIG的低电压穿越能力,改善了Crowbar的低电压穿越技术所引起的机端电压跌落问题,避免了不必要的功率损耗,同时也兼顾了电网故障结束后DFIG稳定运行的能力。在电网故障结束后,

DFIG稳定运行能力较强,机端电压、转子电流在1 s内恢复到稳态值,满足《风电并网技术规程》对低电压穿越能力的要求。

参考文献

- [1] 风电并网技术标准[S]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [2] 胡家兵, 孙丹, 贺益康, 等. 电网电压骤降故障下双馈风力发电机建模与控制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 21-26.
- [3] 朱晓东, 石磊, 陈宁, 等. 考虑阻值和退出时间的双馈风电机组低电压穿越[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18): 29-36.
- [4] 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, 26(7): 30-36.
- [5] 吴方劼, 张文豪, 柯联锦. 应用STATCOM与Crowbar提高风电场低电压穿越能力[J]. 电测与仪表, 2014(7): 33-38.
- [6] 胡书举, 赵栋利, 赵斌, 等. 双馈风电机组低电压穿越特性的试验研究[J]. 高电压技术, 2010(3): 789-795.
- [7] 蔚兰, 陈国呈, 宋小亮, 等. 一种双馈感应风力发电机低电压穿越的控制策略[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 170-175.
- [8] 姜传, 肖湘宁. 应用撬棒电路的双馈型风力发电机低电压穿越分析[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(1-7): 80-83.
- [9] 甄佳宁, 陈益广, 王颖. 双馈感应风力发电机低电压穿越控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(5): 88-91.
- [10] 王桢楠. 风电基地动态无功补偿与低电压穿越的相互影响及协调控制[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.

(收稿日期: 2016-09-04) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告